



**David Filipe
Lopes da Graça**

**Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por
TDP**



**David Filipe
Lopes da Graça**

**Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por
TDP**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas e do Doutor António Manuel De Amaral Monteiro Ramos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha Mãe por todo o apoio, força e sacrifício realizado para me dar a oportunidade de finalizar este Mestrado. Dedico também este trabalho aos meus irmãos pelo seu apoio incondicional nestes cinco anos.

o júri

presidente

Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

arguente principal

Prof. Doutor Mário Augusto Pires Vaz
professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

orientador

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

co-orientador

Prof. Doutor António de Amaral Monteiro Ramos
professor auxiliar convidado da Universidade de Aveiro

Agradeço aos meus coordenadores por toda a passagem de conhecimento e orientação em todas as componentes deste trabalho. A todos os meus amigos e colegas de curso que partilharam este percurso académico e ajudaram a realizar este projeto de alguma maneira. Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro agradeço pelo laboratório e material de estudo cedido para esta dissertação.

A todos um muito obrigado.

palavras-chave

Prótipos, prototipagem rápida, impressão tridimensional, ZPrinter, modelos funcionais.

resumo

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer uma metodologia de alterações dimensionais a aplicar aos modelos CAD de modo a permitir o fabrico de modelos físicos técnico-funcionais por recurso às tecnologias de impressão tridimensional.

Os modelos selecionados para o estudo foram baseados em elementos geométricos simples para mais fácil medição. As formas selecionadas foram cilindros, que se unem de forma simples e por meio de ranhuras ou roscado. Estas geometrias simples continuam a ser constituintes de uma grande parte dos componentes em engenharia, realçando assim a sua importância de estudo.

O trabalho foi dividido em duas fases, na primeira fase os modelos foram fabricados utilizando o pó Zp 130 e na segunda fase usou-se o pó Zp 150. Nessas duas fases analisaram-se os desvios dimensionais e geométricos e correções a aplicar ao modelo CAD de modo a assegurar as diferentes possibilidades de montagem e ajuste dos modelos após impressão.

Foram igualmente estudadas alternativas de baixo custo para o acabamento e pós processamento dos modelos obtidos por estas tecnologias.

Nessa análise os provetes criados foram pequenas réguas escalonadas com diferentes espessuras de forma a representar as diferentes espessuras de parede dos modelos obtidos por impressão 3D, começando com uma espessura mínima da 1 mm e até uma espessura de 5 mm. Através destes provetes pretendeu-se estudar e validar quais as camadas de revestimento necessárias e qual a sua influência na alteração dimensional e geométrica do modelo final. Avaliou-se assim a relação custo benefício de diversos revestimentos considerados *low cost*.

keywords

Prototypes, rapid prototyping, three-dimensional printing, ZPrinter, functional models.

abstract

This work aims to establish a methodology for dimensional changes to be applied to CAD models to enable the manufacture of technical-functional physical models feature by three-dimensional printing technologies.

The models selected for the study were based on simple geometric elements for easier measurement. The shapes selected were cylinders, which are joined in a simple way and through grooves or threading. These simple geometries remain constituting a large part of engineering components, thus enhancing their importance of study.

The study was divided into two phases, in the first phase models have been manufactured using powder Zp 130 and the second stage was used the powder Zp 150. In these two phases were analyzed the dimensional and geometric deviations and corrections to be applied to CAD model to ensure the different possibilities of mounting and adjustment of the models after printing.

Were also studied low-cost alternatives for finishing and post processing of the models obtained by these technologies.

In this analysis the samples created were small scaled rules with different thicknesses to represent the different wall thicknesses of the models obtained by 3D printing, starting with a minimum thickness of 1 mm and to a thickness of 5 mm. Through these rules we intended to study and validate what the coating layers required and what is its influence on the geometric and dimensional changes of the final model. Was evaluated the relation cost benefit of various coatings considered low cost.

Índice

1	Introdução	1
2	Os processos diretos de prototipagem	3
2.1	Processos aditivos industriais.....	3
2.1.1	Estereolitografia (SLA)	3
2.1.2	Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	4
2.1.3	Modelação por Fusão e Deposição (FDM)	5
2.2	Os processos de impressão tridimensional.....	6
2.2.1	Tecnologia ZPrinter®	6
2.2.2	Tecnologia Poly-Jet (Pjet)	7
2.2.3	Tecnologia Perfactory	8
2.2.4	Tecnologia SolidScape	9
2.2.5	Tecnologia Dimension	10
2.3	Processos mais recentes	11
2.3.1	Fusão por Feixe de Eletrões (EBM).....	11
2.3.2	Solidica	12
2.4	Processos descontinuados	12
2.4.1	Fabricação de objeto laminado (LOM).....	12
2.4.2	Solid Ground Curing (SGC).....	13
2.5	Processos subtrativos.....	14
2.5.1	Controlo Numérico Computorizado (CNC).....	14
2.5.2	Maquinagem de Alta Velocidade (HSM)	15
2.5.3	Maquinagem Multi-Eixos	15
2.6	Novos desenvolvimentos e perspetivas atuais	17
2.6.1	Alterações organizacionais e de mercado.....	17
2.7	Novos posicionamentos e produtos de baixo custo	18
2.7.1	3D Systems	18
2.7.2	Stratasys Ltd	20
2.7.3	Denford	23
2.8	Serviços online	23
2.8.1	Necessidade de alterações nos métodos de trabalho	24
2.9	Comparação de processos	25
2.10	Pós-processamento dos protótipos obtidos por TDP	26

2.10.1	Acabamento do Protótipo Estrutural e Visual.....	27
2.11	Referências	29
3	Metodologia e estudo realizado	33
3.1	Materiais e métodos	33
3.2	Estudo Prévio.....	34
3.2.1	Análise funcional	34
3.2.2	Tipos de ligações usadas	34
3.2.3	Análise dimensional e geométrica	35
3.3	Definição dos critérios de análise experimental	37
3.4	Modelos de teste.....	38
3.4.1	Geometrias dos modelos de teste	40
3.5	Equipamento utilizado para obtenção dos modelos	42
3.5.1	Especificações da ZPrinter 310 Plus ®	42
3.5.2	Comparação do pó utilizado na ZPrinter – Zp 150 vs pós anteriores.....	43
3.6	Realização dos ensaios experimentais	44
3.6.1	Fabrico e obtenção dos modelos para ensaio.....	44
3.6.2	Acabamento superficial dos modelos obtidos	44
3.6.3	Aplicação de revestimentos	45
3.6.4	Controlo dimensional e geométrico dos modelos	46
3.7	Resultados obtidos	48
3.7.1	Resultados obtidos na 1ª fase – pó Zp 130	49
3.7.2	Comparação das técnicas de revestimento – Zp 130.....	63
3.7.3	Resultados obtidos na 2ª fase – pó Zp 150	71
3.7.4	Comparação das técnicas de revestimento - Zp 150	83
3.7.5	Modelos funcionais simples	93
3.7.6	Modelos técnico-funcionais	94
3.8	Referências	96
4	Análise de resultados	97
4.1	Análise dos desvios dimensionais obtidos na 1ª Fase - ensaios com Zp 130.....	97
4.1.1	Desvios dimensionais dos modelos segundo os eixos X e Y.....	97
4.1.2	Altura dos modelos	97
4.2	Análise dos desvios geométricos obtidos na 1ª fase.....	98
4.3	Análise das técnicas de acabamento da superfície dos modelos -1ª fase	99

4.4	Análise dos desvios dimensionais obtidos na 2ª Fase - ensaios com Zp 150.....	100
4.4.1	Desvios dimensionais dos modelos segundo os eixos X e Y.....	100
4.4.2	Altura dos modelos	100
4.5	Análise dos desvios geométricos obtidos na 2ª fase	100
4.6	Análise das técnicas de acabamento da superfície dos modelos -2ª fase	101
4.7	Confrontação com a literatura	102
4.8	Referências.....	104
5	Conclusões.....	105

1 Introdução

Este estudo foi elaborado no âmbito da tese de dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, com o título Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por TDP. Todos os materiais utilizados para este trabalho bem como o acesso ao laboratório de desenvolvimento de produto foram generosamente cedidos pelo departamento de Engenharia Mecânica.

A primeira finalidade desta dissertação foi a de estudar vários componentes impressos pela impressora existente no departamento de Engenharia Mecânica, e verificar qual era o desvio existente entre o modelo criado num ambiente CAD e o objeto físico obtido. Em cada uma das fases foi utilizado um consumível diferente, na primeira fase foi utilizado o pó Zp 130 (mais antigo) e na segunda fase usou-se o pó Zp 150 (mais recente). Depois de analisados os desvios foram criadas várias hipóteses de possíveis ajustes que se poderiam dar ao modelo CAD, para que após a impressão este garantisse os valores nominais esperados para o objeto pretendido. Para além da componente dimensional dos objetos, a componente funcional foi estudada, criando vários modelos simples com diversas particularidades mecânicas, no qual se aplicaram os ajustes estudados previamente e onde se validou a sua funcionalidade depois de impressos. Por fim criou-se um mecanismo complexo que englobasse os ajustes estudados e que contivesse as particularidades mecânicas existentes nos modelos mais simples.

Na segunda análise realizada neste projeto, pretendeu-se criar e analisar provetes de teste onde se testaram alternativas aos produtos existentes no mercado, no que toca a acabamento superficial de modelos impressos por impressoras 3D. Tanto para a primeira fase como para a segunda fase desta dissertação foram testados diversos revestimentos *low cost*. Com este estudo pretendeu-se perceber quais são as alterações que cada revestimento provoca no provete de testes criado, as alterações estudadas foram o empeno provocado pelo revestimento e principalmente qual a dimensão final do objeto após da aplicação do revestimento. Não foram usados exatamente os mesmos revestimentos nas duas fases, devidos a diversos fatores, mas os principais revestimentos foram examinados nas duas fases. Com estes revestimentos pretendeu-se não só melhorar apresentação visual ao objeto, mas também dar consistência e impedir que o modelo se desgaste rapidamente com a utilização. Este estudo poderá ser interessante para empresas que usam esta tecnologia da Z Corporation pois poderão poupar algum dinheiro em revestimentos mais caros e difíceis de adquirir.

No primeiro capítulo fez-se um estudo do estado de arte das tecnologias de prototipagem rápida de forma a enquadrar os objetivos desta dissertação.

No segundo capítulo fez-se uma revisão das principais tecnologias de impressão 3D desenvolvidas até aos dias de hoje, as empresas que os comercializam e que tipos materiais usam para criar os modelos. Depois abordaram-se os novos desenvolvimentos e as perspetivas atuais de mercado, novos serviços existentes e novos equipamentos comercializados. Por fim apresentaram-se vários pós-processamentos que se podem aplicar em objetos impressos por impressão 3D.

No terceiro capítulo fez-se uma análise funcional dos objetos selecionados para este estudo. Definiram-se os critérios de análise experimental. Explicaram-se quais foram, como se projetaram e obtiveram os modelos para os ensaios. Apresentaram-se as características estéticas e funcionais dos modelos obtidos e abordaram-se os equipamentos utilizados para realizar os testes funcionais. Neste capítulo também foram apresentados os gráficos com os resultados obtidos de todas as análises efetuadas. Tanto para os modelos funcionais como para os provetes de teste, da primeira e segunda fase.

No quarto capítulo faz-se a análise se resultados comparando os valores obtidos com a literatura existente sobre este assunto.

No quinto e último capítulo faz-se uma conclusão dos resultados obtidos em todas as análises realizadas.

2 Os processos diretos de prototipagem

Os processos diretos de prototipagem têm evoluído rapidamente devido à sua capacidade de criar protótipos 3D diretamente de um modelo CAD, encurtando os tempos de desenvolvimento de um novo produto e melhorando a flexibilidade de uma empresa em criar novos componentes ou mesmo pequenas séries (Xue Yan e P Gu, 1996). Este desenvolvimento permitiu também à indústria criar rapidamente protótipos com boa qualidade para testes funcionais, que depois de analisados podem levar a alterações rápidas no design, material, resistência, tamanho, montagem e cor do produto que se está a desenvolver, estas melhorias podem ajudar a lançar os produtos mais cedo para o mercado ganhando vantagem em relação à competição (Proto Labs, 2010).

Estes processos diretos podem ser processos aditivos ou processos subtrativos. Nos processos aditivos o modelo é construído camada a camada, nos processos subtrativos o material é removido de um bloco inicial até dar origem ao objeto pretendido.

2.1 Processos aditivos industriais

2.1.1 Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia (SLA) foi inventada por Charle Hull. Este processo foi pioneiro nos processos de prototipagem rápida e é considerado o processo mais abrangente no mercado. É um processo aditivo que usa um tanque de polímeros líquidos fotosensíveis que solidificam por ação de radiação UV proveniente de um laser controlado por computador (figura 1). A estereolitografia constrói o modelo através direcionamento do feixe laser sobre a superfície do tanque com resina, polimerizando deste modo uma fina camada do objeto. Após a construção de cada camada, a plataforma de suporte desce e é sobreposta uma nova camada de resina líquida sobre a anterior. A nova camada é alisada através de uma faca que percorre toda a superfície do tanque. Durante o processo poder ser necessário o recurso a estruturas de suporte, pilares ou pontes, para apoiar a construção de elementos geométricos suspensos eventualmente existentes nos modelos. Quando se completa o ciclo da máquina, o protótipo está aproximadamente 95% curado (Xue Yan and P Gu, 1996). Pelo que se torna necessário proceder a uma pós-cura que é feita num forno fluorescente de radiação ultravioleta, de modo a completar a polimerização do protótipo e assegurar a sua integridade estrutural.

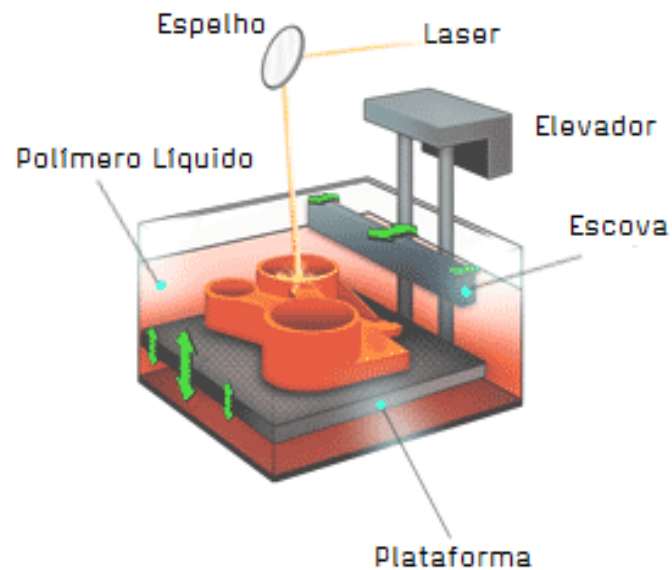


Figura 2.1. - Processo de estereolitografia, SLA [adaptado de <http://www.ccc.gb.com/stereolithography-sla-process-prototyping-techniques-for-injection-moulding-components.php>]

2.1.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A sinterização seletiva a laser (SLS) foi desenvolvida e patenteada por Carl Deckard (Deckard, 1986) no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Texas em Austin. O SLS é um processo aditivo que usa um laser de CO₂ para sinterizar seletivamente uma fina camada de pó (figura 2). Esse pó não é limitado a um pó específico, pode ser de diversas naturezas: polimérico, metálico, cerâmico ou materiais compósitos. O processo inicia-se com a deposição de uma fina camada de pó na plataforma de trabalho, o pó existente na zona de trabalho foi submetido a um pré-aquecimento até uma temperatura ligeiramente abaixo do ponto de fusão. De seguida o laser varre a superfície do pó até fundir e aderir as partículas correspondentes à secção do modelo. A plataforma de trabalho desce e o processo repete-se até o protótipo estar completo. O material que não é fundido funciona como suporte durante a construção do modelo. No final do processo pó não sinterizado é aspirado e as superfícies do protótipo são limpas.

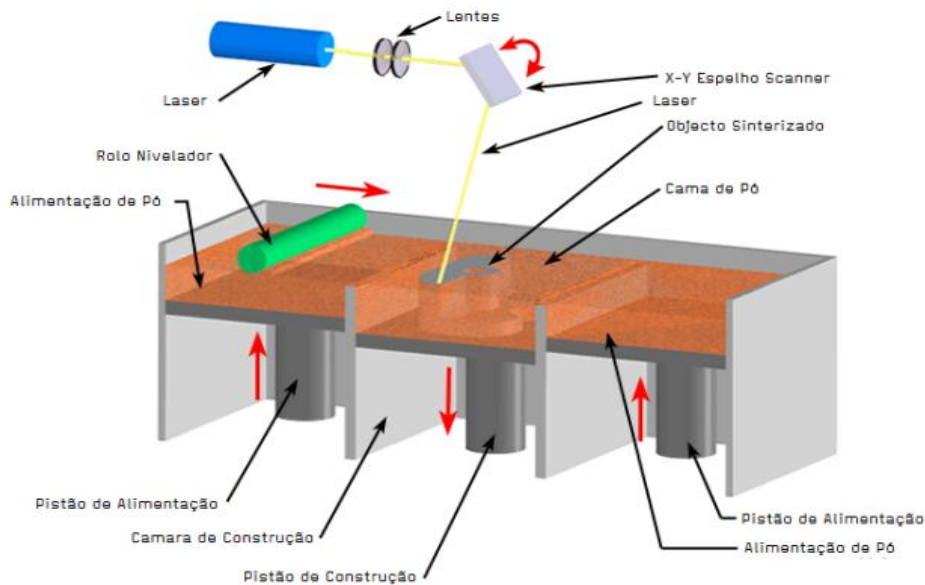


Figura 2.2 – Processo de sinterização seletiva a laser, SLS [adaptado de <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>]

2.1.3 Modelação por Fusão e Deposição (FDM)

O processo modelação por fusão e deposição foi inventado por S. Scott Crump em 1989. Este processo de prototipagem rápida é baseado na deposição por extrusão de termoplásticos aquecidos (figura 3), apesar dos fundamentos do processo permitirem a sua aplicação a uma grande variedade de materiais, tais como: ceras, resinas, termoplásticos, metais e vidro. O processo consiste em aquecer o material até uma temperatura ligeiramente acima da temperatura de fusão o que permite que o material flua facilmente e solidifique assim que entre em contacto com uma superfície sólida. A camada correspondente à secção do modelo é construída pela deposição por varrimento de um filamento de material extrudido. No final da construção de uma camada a plataforma desce e o processo repete-se até o protótipo estar completo. Durante o fabrico do protótipo pode haver a necessidade de criar suportes estruturais, que serão posteriormente removidos. Todo o processo ocorre dentro de uma câmara aquecida para minimizar deformações decorrentes da variação da temperatura (Crump, 1989).

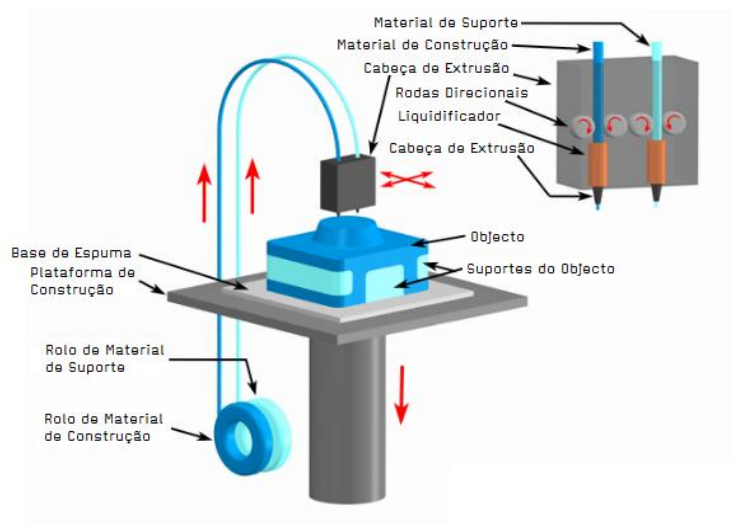


Figura 2.3 – Processo de modelação por fusão e deposição, FDM [adaptado de <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>]

2.2 Os processos de impressão tridimensional

2.2.1 Tecnologia ZPrinter®

As impressoras tridimensionais usam tecnologia padrão de impressão para criar camada a camada os protótipos 3D, e apesar dos desenvolvimentos ocorridos nestes equipamentos de prototipagem, estes ainda são vistos como um "modelador de conceito". A tecnologia ZPrinter (ZPrinter®) é provavelmente o mais reconhecido processo de TDP e caracteriza-se por utilizar um pó "similar a um cerâmico" e uma cola infiltrante depositada através das "cabeças impressoras" para construir os modelos. O processo inicia-se com a deposição de uma fina camada de pó na mesa de trabalho, existe um rolo que alisa uniformemente a superfície de pó (figura 4). O líquido aglomerante (cola) é depositado na superfície do pó na zona correspondente à seção do modelo, através das cabeças de impressão, podendo ou não conter cor. O pó que não é usado atua como estrutura de suporte durante a construção. No fim de cada camada a plataforma de trabalho desce e o processo de construção da camada seguinte repete-se. No fim do processo o restante pó é aspirado e o protótipo segue para o pós-processamento. (Z Corporation, 2002). Este é o único processo atualmente que permite a obtenção de modelos a cores e com gradientes.

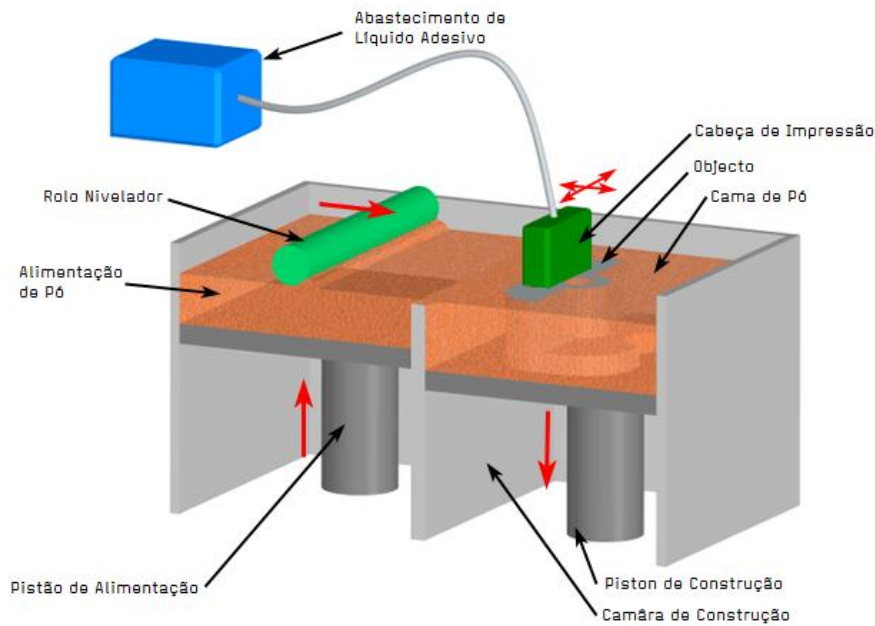


Figura 2.4 – Processo de impressão tridimensional, Zprinter [adaptado de <http://infotechmasters.com/revolutionary-technology-3d-printing-is-here-to-take-over-the-world-video.html/>]

2.2.2 Tecnologia Poly-Jet (Pjet)

Este processo usa igualmente uma tecnologia baseada em cabeças de impressão, sendo no entanto, estas cabeças distintas das utilizadas em impressoras convencionais (figura 5). O material utilizado na construção dos modelos é uma resina sensível à luz, que é depositada em camadas ultra finas na área de trabalho, através das cabeças de impressão. Após a deposição de cada camada o material é curado instantaneamente por uma luz UV e uma nova camada é construída em cima da anterior, até finalizar o protótipo. Neste processo a estrutura de suporte é impressa diretamente com o protótipo sendo isso possível através do facto das cabeças de impressão estarem equipadas com dois grupos de injetores (8 injetores no total), quatro para depositar material estrutural e outros quatro para depositar material de suporte. O material de suporte no fim pode ser removido à mão ou recorrendo a um solvente (que pode ser água). Este processo, comparativamente aos outros processos de adição, tem o melhor acabamento superficial (Proto Labs, 2010).

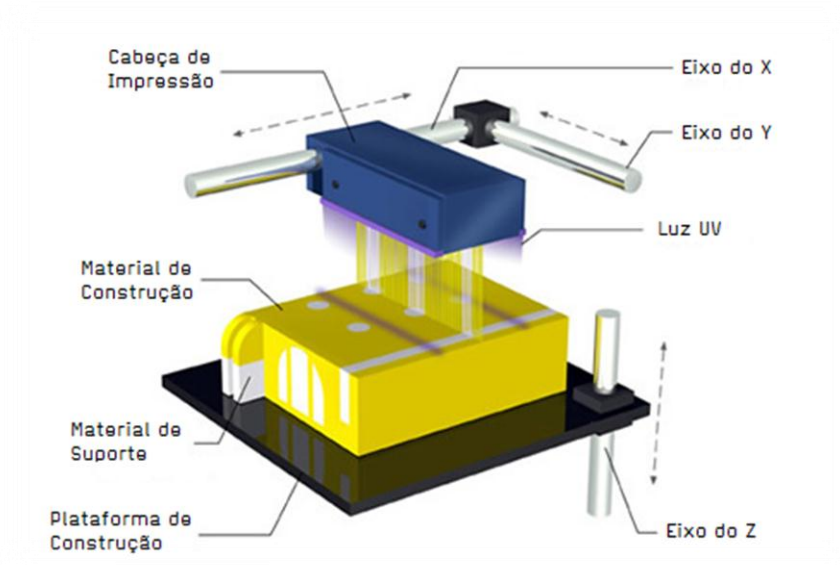


Figura 2.5 – Processo de Polyjet, Pjet [adaptado de <http://www.emsproto.it/HOW.html>]

2.2.3 Tecnologia Perfactory

Sistema patenteado pela empresa envisionTEC (envisionTEC,2012). Este processo utiliza resina líquida foto sensível, à semelhança da estereolitografia, mas tal como o processo da polyjet utiliza uma luz em vez de um laser. Utiliza uma tecnologia de projeção denominada de DLP (Digital Light Processing), que utiliza cerca de 1,5 milhões de micro espelhos que podem ser controlados individualmente, para criar a projeção de um plano de secção do objeto a construir. A luz é emitida para a superfície do líquido, endurecendo-o camada a camada. Ao contrário de outros processos o Perfactory constrói o protótipo subindo a plataforma da área de trabalho estando apenas submersa a camada que está prestes a ser polimerizada (figura 6). Como o protótipo é construído em meio líquido existe a necessidade de criar estruturas de suporte, sendo estas geradas automaticamente pela máquina, e posteriormente removidas após a finalização do modelo.

Podem ser utilizados diversos tipos de materiais, como: cera, resinas, compósitos cerâmicos, etc. A resolução e reprodução do detalhe apresentado por este processo relativamente a outros processos é significativamente melhor.

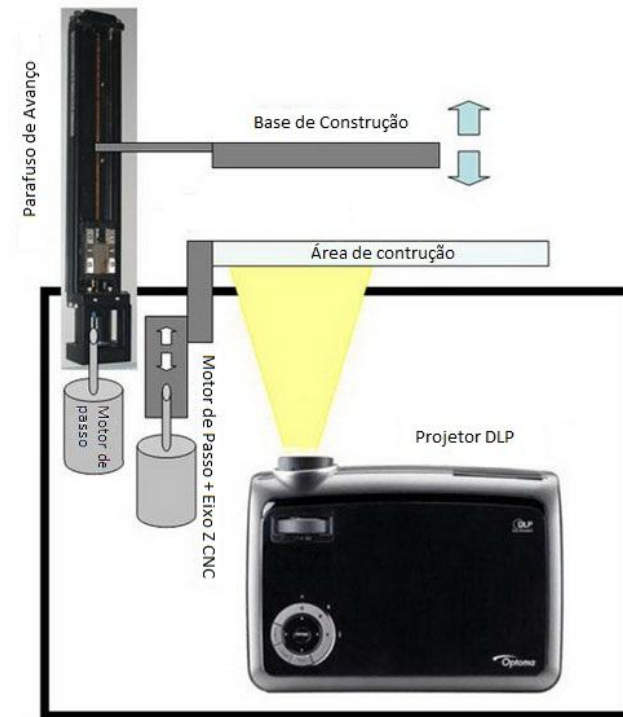


Figura 2.6 - Processo Perfactory [adaptada de <http://blog.makezine.com/2010/10/15/homemade-high-resolution-dlp-3d-pri/>]

2.2.4 Tecnologia SolidScape

É um processo desenvolvido e comercializado pela empresa Solidscape®, Inc.. Trata-se de um processo bastante utilizado pela indústria da joalheria, pela medicina dentária e auditiva, pois cria modelos em cera com excelente detalhe e acabamento superficial que são posteriormente utilizados em fundição de cera perdida (Solidscape, 2011). O SolidScape funciona com duas cabeças de impressão de cera quente, uma que imprime a estrutura de suporte e outra a peça a obter. A peça é construída camada após camada como nos outros processos TDP (figura 7). A cera de suporte é posteriormente removida da peça por imersão desta em um solvente.

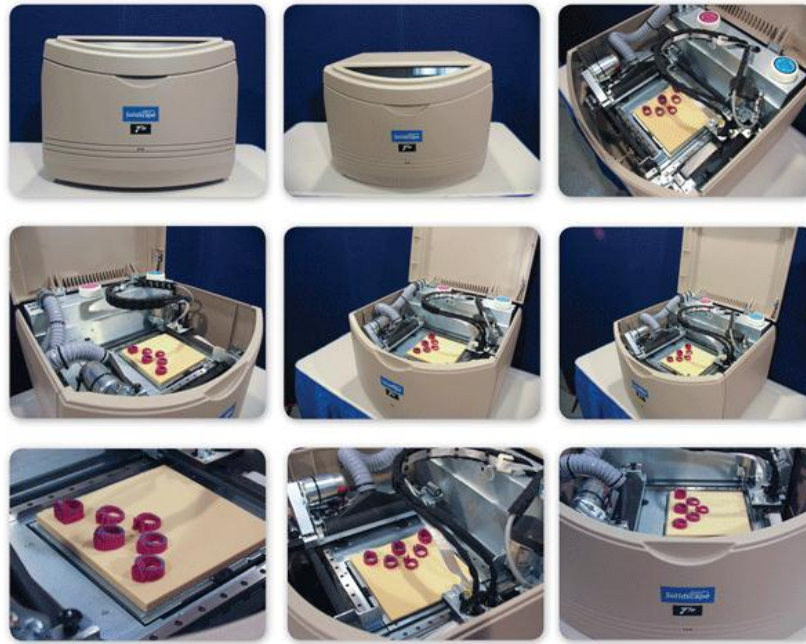


Figura 2.7 – Processo SolidScape [fonte: <http://www.esslinger.com/t76photogallery.aspx>]

2.2.5 Tecnologia Dimension

Comercializado pela empresa Dimension (pertencente ao grupo Stratasys que desenvolveu e comercializa o processo FDM), é um sistema que se baseia na tecnologia FDM, mas utiliza injetores de maior dimensão o que permite reduzir o tempo de construção dos modelos “à custa” de uma menor qualidade dos mesmos. Porque utiliza materiais termoplásticos permite obter protótipos funcionais e com possibilidade de escolha de várias cores. Tal como no processo FDM a impressão é feita por duas cabeças injetoras, uma de material de suporte e outra de material estrutural do modelo. Não é necessário pós-cura pois os modelos saem da impressão completamente sólidos (Dimension, 2012). O material mais utilizado é o ABSplus que é em média 40% mais resistente que o ABS normal, fazendo destes protótipos muito bons para testes funcionais. A estrutura de suporte é removida posteriormente à mão ou com auxílio de solventes (Laserlines, 2012). Os modelos depois de construídos podem ser furados ou pintados como qualquer peça plástica.

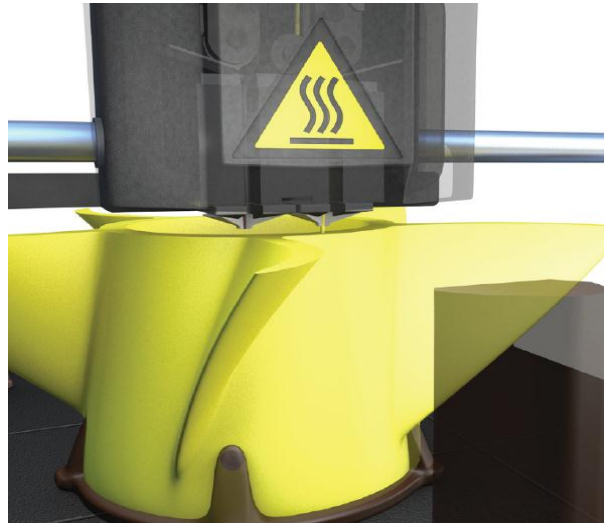


Figura 2.8 – Processo Dimension [fonte: <http://www.esslinger.com/t76photogallery.aspx>]

2.3 Processos mais recentes

2.3.1 Fusão por Feixe de Eletrões (EBM)

O processo de Fusão por Feixes de Eletrões EBM cria objetos metálicos sólidos a partir de pó metálico. O pó é distribuído uniformemente na área de trabalho, depois é pré aquecido até uma temperatura específica (dependendo do material) e por fim um feixe de eletrões faz o varrimento da geometria exata do modelo 3D. O processo é repetido camada a camada. Os modelos são construídos em ambiente de vácuo a elevadas temperaturas o que permite ao material aliviar as tensões internas obtendo assim melhores propriedades do que peças obtidas por fundição. O pó que não é fundido serve de estrutura de suporte (figura 9). A tecnologia EBM garante grande capacidade de fusão do material tendo assim grande produtividade (Arcam, 2012).

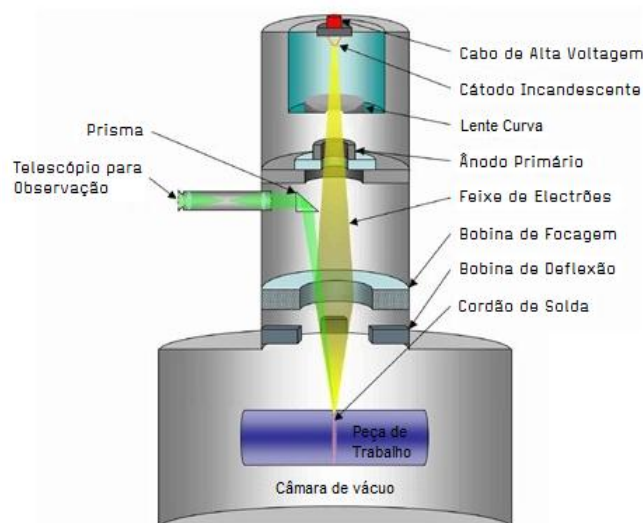


Figura 2.9 – Processo de fusão por feixe de eletrões, EBM [adaptada de <http://www.joiningtech.com/industry-references/welding-types/electron-beam-welding>]

2.3.2 Solidica

É um processo concebido para produzir peças ou moldes metálicos evitando a necessidade de uso de várias máquinas, eliminado assim passos de fabricação e custos. Segundo o fabricante, esta tecnologia combina o melhor de dois mundos, construção aditiva e subtrativa. No processo aditivo existe um rolo de chapa metálica que é desenrolado sobre a área de trabalho e cortado na medida necessária, depois uma fresa CNC retira o material em excesso e define a geometria da seção do modelo (processo subtrativo), de seguida é adicionada uma nova chapa que é soldada por ultra-sons à chapa anterior e o processo repete-se. Este processo tem a possibilidade de usar vários metais na construção bem como a possibilidade de colocar cabos e fios no interior da peça (Ultrasonic Consolidation, 2002).

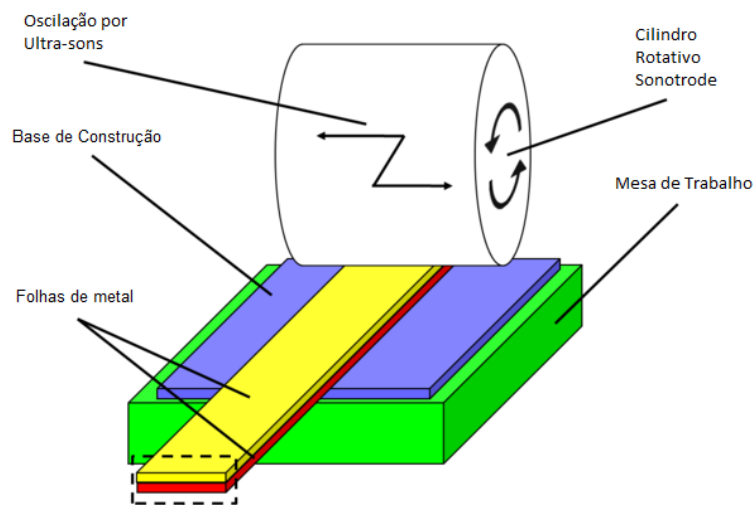


Figura 2.10 – Processo Solidica [adaptada de http://en.wikipedia.org/wiki/File:UC_Schematic.png]

2.4 Processos descontínuos

2.4.1 Fabricação de objeto laminado (LOM)

Este processo produz protótipos por corte e colagem de sucessivas camadas de folhas (Figura 11). Essas folhas podem ser de papel, plástico, fibras ou compósito. A alimentação da área de trabalho é feita por rolos. Assim que uma nova camada é colocada um raio laser corta a seção desejada a plataforma desce, é colocada uma nova camada (folha de papel) sobre a camada anterior e o processo continua. A adesão da cada nova folha à anterior é feita por colagem uma vez que o papel está impregnado com uma cola térmica que é ativada por um rolo aquecido (Xue Yan e P Gu, 1996). O restante material que não faz parte do modelo, atua como estrutura de suporte, mas é reticulado pelo laser durante a definição da camada e no fim do processo é removido a mão.

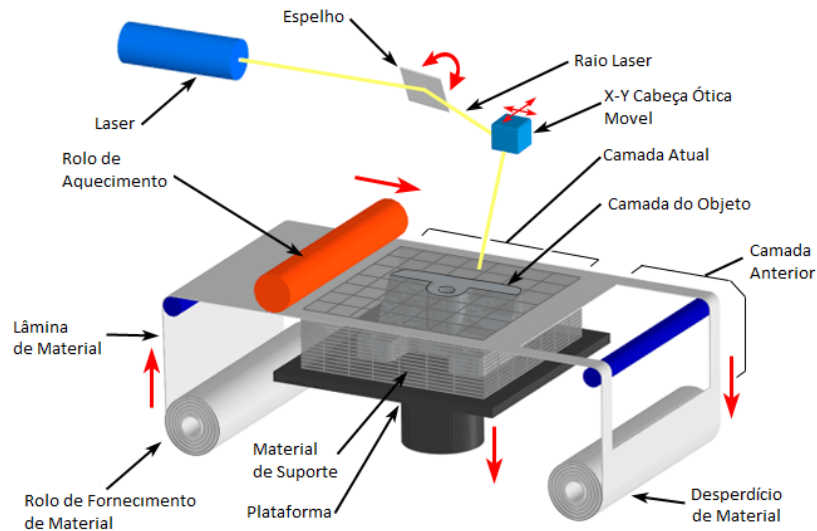


Figura 2.11 - Fabricação de objeto laminado, LOM [adaptada de <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>]

2.4.2 Solid Ground Curing (SGC)

Neste processo é criada numa placa de vidro através de uma carga electrostática uma mascara com a imagem negativa da seção do modelo pretendido. Entretanto é espalhada na área de trabalho uma camada de resina líquida fotossensível. Depois a placa de vidro é colocada entre a lâmpada UV e a resina só a área desta exposta à luz irá solidificar. A resina que não foi solidificada é retirada por um aspirador e a área de trabalho move-se de novo para de baixo da lâmpada UV para solidificar a resina que não foi totalmente removida. Os espaços vazios são preenchidos por cera quente que funciona como estrutura de suporte para as camadas seguintes. Depois a cera é arrefecida numa placa fria, a sobreespessura é removida, para a espessura pretendida, recorrendo a uma fresa. Depois a área de trabalho move-se para a área de exposição, deposita-se a resina e o processo repete-se até obter a peça. Este processo é bastante dispendioso se se quiser fazer apenas uma peça porque a resina (em excesso) que foi aspirada não pode ser reutilizada pois foi parcialmente curada (X. Zhang 2002).

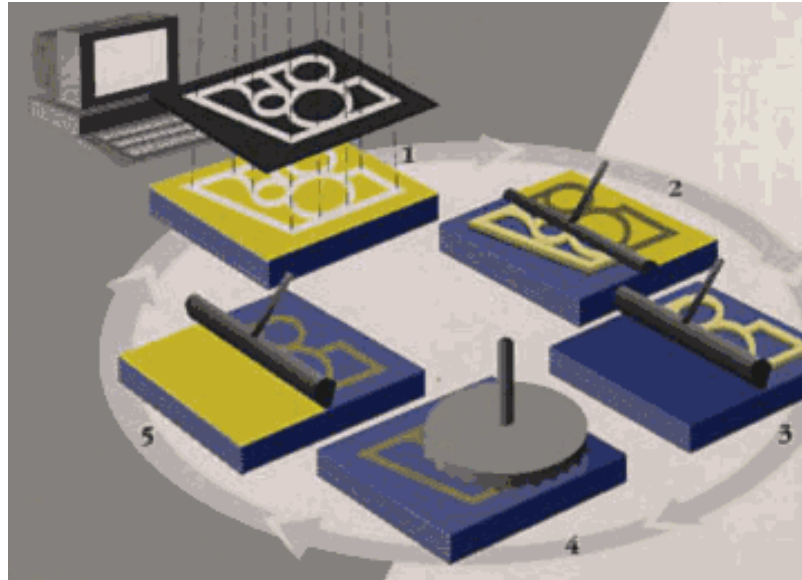


Figura 2.12 – Processo Solid Ground Curing, SGC

2.5 Processos subtrativos

2.5.1 Controlo Numérico Computorizado (CNC)

O CN (Controlo Numérico) tal como existe hoje em dia nasce com John Parsons na “Parsons Corporation” em 1947. Esta tecnologia utiliza um computador para controlar os movimentos dos eixos de uma máquina-ferramenta. Na maquinagem por CMC parte-se de um bloco sólido de material, podendo ser este metálico ou não metálico, ao qual é removido o material em excesso até se obter a forma pretendida. As peças são desenhadas num sistema de CAD e depois transferidas para um software de CAM, onde são definidas os diversos parâmetros de fabrico, como o desbaste do material e o acabamento da superfície final, a ferramenta a utilizar e as trajetórias de corte (Relvas, 2012). Este processo produz protótipos com maior homogeneidade e resistência mecânica pois já são fabricados no material final e não camada a camada como os processos aditivos (Proto Labs, 2010).

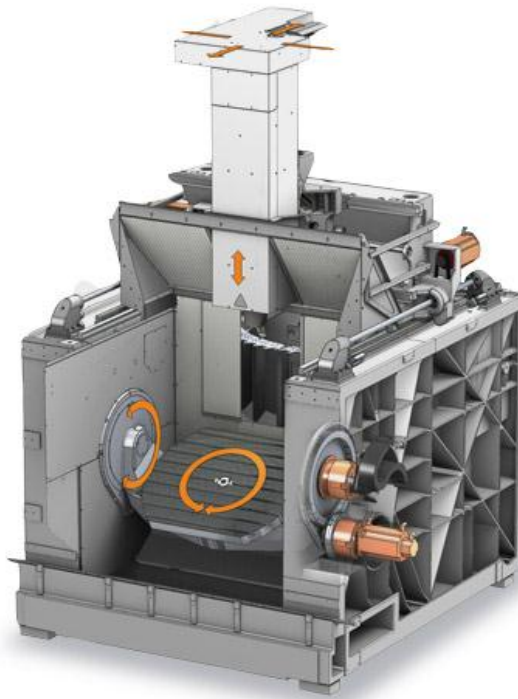


Figura 2.13 – Processo de controlo numérico computadorizado, CNC [fonte: <http://www.wiser.fr/deltamachines/fraisage/hermle/c50/>]

2.5.2 Maquinagem de Alta Velocidade (HSM)

A Maquinagem de Alta Velocidade, sigla MAV em português, é caracterizada pela gama de velocidade de rotação e taxa de avanço bastante superiores às normalmente utilizadas. Este processo torna-se mais rentável através de combinação perfeita entre rotação, avanço e profundidade de corte tão altas quanto possível. Este aumento da velocidade de corte proporcionou assim a possibilidade de obter acabamentos superficiais próximos do polimento, dispensado um pós polimento. Esse aumento de velocidade também permitiu a maquinagem de materiais de elevada dureza, contribuindo assim para a redução do tempo de fabricação de um componente.

Esta tecnologia, para além da redução dos tempos de fabricação, tem como objetivo ser eco-eficiente, reduzindo ou eliminando por completo a utilização de fluidos de corte (Relvas e Neto, 2011).

2.5.3 Maquinagem Multi-Eixos

A tecnologia multi-eixos foi utilizada inicialmente pela indústria aeroespacial, mas encontra-se em grande expansão, devido ao crescente interesse demonstrado por vários outros sectores industriais. Esta tecnologia possibilita a maquinagem de peças com elevada complexidade, impossíveis de realizar numa máquina de 3 eixos, pois permite maquinar peças de alta complexidade utilizando apenas uma única posição de aperto, eliminando a perda de tempo na troca da fixação e imperfeições causadas por essa

mudança de aperto, aumenta a produtividade. Permite também eliminar vibrações e melhoramento do acabamento de superfície, pois possibilita a utilização de fresas com dimensões reduzidas e mais rígidas.

O controlo destas máquinas pode ser realizado em 3+2 ou 5 eixos simultâneos. A complexidade da programação, e a necessidade de operadores com níveis mais altos de qualificação é consideradamente mais elevada comparando com máquinas de 3 ou 4 eixos, em máquinas de 3+2 utilizam-se 2 eixos para controlar o posicionamento da árvore ao início e depois a maquinagem é feita nos 3 eixos tradicionais, em máquinas de 5 eixos os movimentos são sincronizados e simultâneo nos 5 eixos. Geralmente as máquinas de 5 eixos são equipamentos de alta velocidade (Relvas e Neto, 2011).

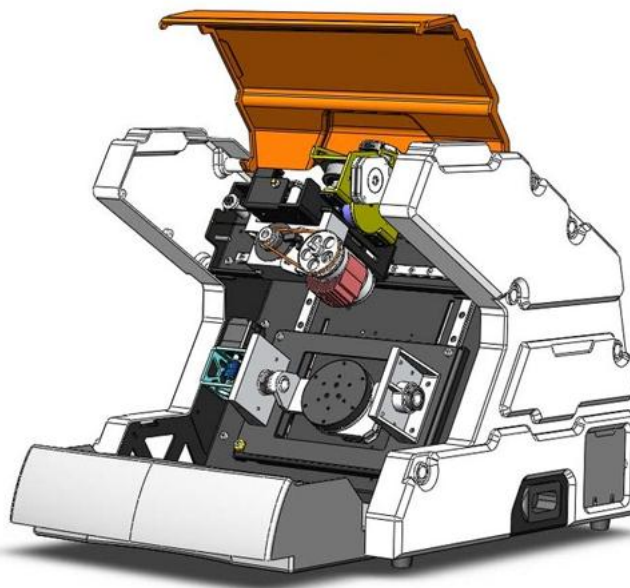


Figura 2.14 – Processo de controlo numérico computadorizado multi-eixos, CNC Multi-Eixos [fonte: <http://grabcad.com/library/5-axis-desktop-cnc-machining-concept-model>]

2.6 Novos desenvolvimentos e perspectivas atuais

2.6.1 Alterações organizacionais e de mercado

Neste primeiro semestre de 2012 grandes alterações ocorreram ao nível da organização dos principais “players” da prototipagem rápida, centralizando as mais importantes tecnologias em duas empresas, na 3D Systems e na Stratasys.

2.6.1.1 3D Systems

No início do ano a 3D Systems anunciou a aquisição da Z Corporation (“Z Corp”) e da Vidar Systems (“Vidar”), fundindo assim as companhias e o seu pessoal numa única. Esta aquisição estendeu assim a gama de tecnologias, preenchendo algumas lacunas de preços com produtos e tecnologias complementares, aumentando também para o dobro a sua cobertura de revenda de produtos globalmente.

Com a aquisição da Z Corporation a 3D Systems passou a conter no seu portefólio, toda a tecnologia de impressoras ZPrinter, fortemente conhecidas pela indústria pela sua versatilidade e qualidade. Com a compra da Vidar Systems passou a conter tecnologia de imagem ótico especializada em mercados de imagens médicas e dentais.

Com esta aquisição a 3D Systems contam agora a tecnologia SLS, SLA e 3D Printer entre outras (3D Systems, 2012).

2.6.1.2 Stratasys

A fusão com a companhia Object, acontece depois, de no passado ano de 2011 a Stratasys adquirir a Solidscape. Sendo esta uma fusão e não uma aquisição, uma nova direção será formada juntando membros das duas companhias, que passará a ser chamada Stratasys Ltd (Engineering.com, 2012).

Com esta fusão a nova companhia irá conter tecnologia para uma ampla gama de aplicações dentro de uma ampla gama de setores da indústria. Juntando à FDM e Solidscape a Object acresce a esta companhia a tecnologia Polyjet, que oferece impressão de alta resolução adequada para prototipagem rápida e aplicações que requerem alta funcionalidade detalhes e um acabamento de superfície mais fina (Object, 2012).

2.6.1.3 Denford

A Denford, empresa sediada no Reino Unido, tem uma grande tradição em engenharia e fabrico de máquinas-ferramentas CNC para “desktop”. Recentemente lançou-se no mercado das impressoras 3D com a impressora *UP! 3D Plus Printer* que é ideal para a educação, engenharia e pequenas aplicações (Denford, 2012). Devido ao seu baixo custo e reduzidas dimensões esta impressora pode ser adquirida por particulares para ser usada em casa, para criar pequenos objetos e brinquedos.

2.7 Novos posicionamentos e produtos de baixo custo

Num futuro recente as impressoras deixarão de ser exclusivas de ambientes industriais e passarão também a ser domésticas. Objetos poderão ser desenhados e impressos pelos utilizadores dentro das suas casas. Talvez para já as pessoas não consigam criar partes funcionais para substituir algo que se partiu nas suas casas ou no carro, mas para criar pequenos objetos de lazer, como copos personalizados e pequenos brinquedos. Para esse mercado começam a aparecer as primeiras impressoras 3D de baixo custo, que permitem ao utilizador ser o criador de novos objetos ou apenas adquirir, de uma biblioteca digital, o ficheiro CAD de um objeto pretendido, que depois pode imprimir em casa (Janice Karin, 2011).

2.7.1 3D Systems

a) The Cube

The Cube é a primeira impressora 3D para ter em casa, é compacta fácil de utilizar e é completamente sem fios, pode se controlada por wi-fi ou utilizar por uma *pen* USB para fazer transferência dos modelos. Usa tecnologia Plastic Jet Printer (PJP) que é semelhante à tecnologia FDM, mas está apenas contem uma cabeça de impressão. Tem 10 cores diferentes á escolha. Com vista ao mercado doméstico a Cubify permite fazer download de 25 modelos grátis do site oficial, como também permite a qualquer pessoa enviar os seus modelos para que outros possam fazer download. A impressora vem com software próprio muito fácil de utilizar. Preço base de 1080€ aproximadamente (Cubify, 2012).



Figura 2.15 – The Cube [fonte: http://www.pcworld.com/article/254046/cube_3d_a_3d_printer_for_the_home.html]

b) 3DTouch 3D Printer

Também da 3D Systems a 3D Touch é uma impressora maior, com maior capacidade de impressão, mas também destinada ao mercado doméstico, educacional e escritório. Pode criar brinquedos e pequenos protótipos. Com tecnologia FDM, pode conter entre uma e três cabeças de impressão, no caso de ter duas ou três cabeças uma delas pode conter material de suporte. A impressora vem com software próprio e com atualizações gratuitas. A qualidade de impressão é superior mas também é mais dispendiosa. O preço varia entre 2590€ e os 3240€, para impressoras com uma cabeça ou com três (3DTouch, 2012).

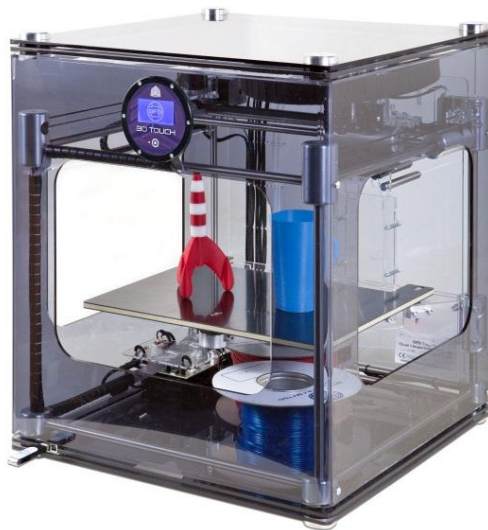


Figura 2.16 - 3DTouch [fonte: http://teambastech.com/Store/index.php?route=product/product&product_id=206]

c) ZPrinter 150

A ZPrinter® 150 Professional 3D Printer, começa por entrar no segmento profissional das impressoras de três dimensões, mas devido ao seu custo, cerca de 12500€, esta impressora pode ser adquirida para diversos fins. Apresentando uma tecnologia diferente dos seus rivais, usando um pó compósito, imprime com uma resolução de 300 x 450 dpi fazendo desta impressora uma boa solução tanto para pequenos negócios como para fins domésticos. Utiliza software próprio e é amiga do ambiente com zero perdas de material (ZPrinter 150, 2012).



Figura 2.17 - ZPrinter 150 [fonte: http://www.estrojarstvo.sk/index-estrojarstvo.php/category/3D_technologie/product/z_corporation/id/409]

2.7.2 Stratasys Ltd

a) HP Designjet Color 3D Printer

A HP Designjet 3D Printing é uma impressora criada pela empresa Stratasys Ltd mas comercializada pela Hewlett-Packard. Contem duas cabeças de impressão, uma com material de construção ABS e a outra com material de suporte, o material de construção está disponível em 8 cores diferentes. Com um preço de 17500€ esta impressora situa-se num patamar mais profissional, mas que ao mesmo tempo pode ser adquirido por particulares para uso domestico ou para a educação. Com grande resolução de construção e software próprio de impressão (Designjet 3D, 2012).



Figura 2.18 - HP Designjet [fonte: http://www.laserlines.co.uk/htm/rp/hp_range.htm]

b) Mojo 3D Printer

A impressora Mojo é uma impressora desenvolvida pela Stratasys Ltd com um preço de aproximadamente 7900€. Este equipamento imprime com ABSplus e material de suporte. Uma das inovações deste produto são as recargas de material de impressão, que são bastante fáceis de montar e cada recarga vem com uma cabeça de impressão nova para se obter máxima qualidade e precisão. O kit da impressora inclui também um equipamento de limpeza, para remover o material de suporte. Com uma resolução de 0.1778 mm a impressão é bastante precisa e rápida. Com um dos preços mais baixo do mercado esta impressora é uma boa alternativa para negócios e mercado doméstico (Mojo, 2012).



Figura 2.19 - Mojo 3D [fonte: <http://www.3d-printers.com.au/2012/09/11/mojo-3d-printer/>]

c) uPrint SE 3D Printer

A uPrint é uma impressora mais profissional pois têm uma maior capacidade de impressão e tem maior área de impressão. Imprime com ABSplus e material de suporte. O preço começa nos 12700€ e inclui equipamento de limpeza e material de construção e de suporte. Com a boa resolução e com a resistência que o material tem, a empresa garante que é apropriado para formação de plástico em vácuo (uPrint, 2012).



Figura 2.20 – uPrint [fonte: <http://www.bug.hr/vijesti/3d-pisac-iz-hp/100262.aspx>]

d) Objet24 Desktop 3D Printer

Utilizando a tecnologia PolyJet com uma resolução de apenas 0.028 mm a Object24 é a impressora com melhor resolução e que imprime paredes com espessuras mais finas. Utiliza materiais resistentes e imprime pequenos mecanismos móveis. Conta com duas cabeças de impressão, uma de material de construção e outra de material de suporte, o material de suporte pode ser removido com o equipamento específico. Com um preço de aproximadamente 18200€ não é o equipamento mais económico do mercado, mas é o que tem a maior resolução de todos os equipamentos apresentados (Objet, 2012).



Figura 2.21 - Objet24 [fonte: <http://sapiencecorporation.com/3d-printers/objet24-1>]

2.7.3 Denford

a) UP! 3D Plus Printer

A UP! 3D é uma impressora desenvolvida pela Denford, empresa esta que se aventura agora no mercado das impressoras 3D depois do seu grande historial em pequenas máquinas usadas para a educação. Com um preço base de aproximadamente 1900€ é a impressora mais compacta existente no mercado, sendo facilmente guardada em qualquer lado. Não tem uma segunda cabeça de impressão de material de suporte, mas esta gera suportes automaticamente que podem ser removidos depois. Uma impressora concebida para pequenas empresas e para educação (Denford, 2012).

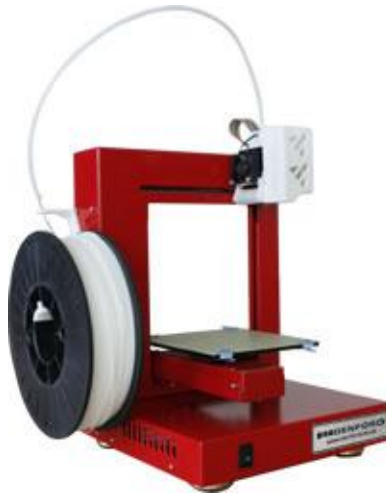


Figura 2.22 - UP! 3D [fonte: <http://website.denford.ltd.uk/>]

2.8 Serviços online

Nesta crescente luta pelo mercado de impressoras de três dimensões a tendência é não só criar novos equipamentos mas também novos serviços, nesse sentido as empresas começam a criar serviços de impressão de peças criadas pelos utilizadores. A impressora Cubify, tem um serviço online que permite criar pulseiras, anéis, brincos e brinquedos personalizados a partir de uma aplicação disponibilizada para todos os utilizadores, que depois de criado o objeto pode ser impressa em casa. Outro serviço utilizado inicialmente pela *My Robot Nation* (recentemente adquirida pela 3D Systems) permite ao utilizador criar os seus próprios objetos e depois enviar para a empresa, a empresa imprime os modelos de acordo com as especificações do utilizador e depois envia para casa a peça final.

Este tipo de serviços é apenas o início de um futuro onde objetos funcionais ou brinquedos para a família podem ser criados e personalizados à medida de cada utilizador.

2.8.1 Necessidade de alterações nos métodos de trabalho

Conceber 3D

Nos dias de hoje e com as ferramentas de design a serem cada vez mais usadas conceber os seus próprios modelos é uma tarefa cada vez mais fácil e rápida. Tanto para realizar testes mecânicos computadorizados como para testes de construção e posterior impressão. Mas como em todos os projetos tem que se ter em consideração os equipamentos que vão ser usados para criar o objeto, daí a necessidade de alterar os métodos de trabalho atuais no que toca a conceber modelos para impressão 3D. Na impressão 3D as limitações de design não são o problema, porque atualmente pode-se desenhar e imprimir qualquer forma pretendida, o problema prende-se com as tolerâncias que se tem que dar ao objeto se se pretender um modelo funcional. Nesse caso todo o projeto de design tem que ser pensado para a posterior impressão.

Adaptar para obter o modelo físico (necessidade de determinar folgas)

Nesta nova visão de mercado a conceção de novos modelos 3D terá que ser planeada com vista a garantir as medidas exatas pretendidas pelo utilizador depois da impressão. Sabe-se que qualquer um dos processos de impressão 3D existentes atualmente tem erros de impressão, uns mais que outros, o que faz com que no final o modelo não tenha exatamente as medidas esperadas pelo utilizador. Para combater estes erros o utilizador terá de ter em conta qual é a folga/erros específicos da máquina que vai utilizar e fazer um projeto desde raiz com as correções necessárias. Se o utilizador, depois da impressão, quiser realizar um acabamento superficial terá que ter isso em conta também, para que no fim tenha as dimensões pretendidas.

Daí a importância desta pesquisa realizada nesta dissertação, que nos dá uma ideia do tipo de considerações e tolerâncias que se tem que ter em consideração ao quando se realiza um trabalho de prototipagem rápida.

Envio para fabrico

A impressão do modelo pode ser feita numa impressora própria, ou pode-se atualmente recorrer a empresas especializadas que imprimem o modelo pretendido e depois o enviam para a morada pretendida. No caso de querer uma pequena série ou apenas um exemplar do modelo, as empresas de impressão são uma boa opção, mas a impressão pode ser feita diretamente como vai no ficheiro que se envia para a empresa, o que no fim pode originar erros nas dimensões se não se tiver cuidado. Por isso se se pretender enviar para impressão algum modelo deve-se estar informado quanto as folgas/erros da impressora que vai se usada para projetar o modelo já com as devidas correções.

2.9 Comparação de processos

Vantagens e desvantagens dos de prototipagem rápida atuais.

	Vantagens	Desvantagens
SLA	<ul style="list-style-type: none"> -Peças com geometrias complexas -Boa precisão dimensional -Peças com muito bons detalhes -Muito bom acabamento superficial -Possível obtenção modelos parcialmente ocos (QuickCast e Skin and Core) 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessidade de suportes estruturais -Contração e empenos do modelo -Utilização de matérias tóxicos -Elevado custo de resinas -Necessidade de pós-cura -Elevado tempo de fabrico
SLS	<ul style="list-style-type: none"> -Não necessidade de pós-cura -Não necessita de suportes estruturais -Grande variedade de materiais utilizados -Possibilidade de empilhamento de várias peças para fabricação -Obtenção de peças com elevada resistência mecânica e térmica 	<ul style="list-style-type: none"> -Contração e empenos do modelo -Possibilidade de emissão de gases tóxicos -Consumo energético elevado -Fraco acabamento superficial -Elevado custo das matérias primas
FDM	<ul style="list-style-type: none"> -Possibilidade de montar o equipamento em ambiente de escritório -Possibilidade de mudança de material para produzir protótipos com vários materiais e varias cores -Os protótipos podem ser usados em ensaios funcionais 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessidade de suportes estruturais -Processo lento -Fraco acabamento superficial -Fracá precisão
ZPrinter	<ul style="list-style-type: none"> -Processo de fabrico rápido -Materiais baratos -Permite obter modelos coloridos -Geometrias complexas -Não necessita de suportes estruturais 	<ul style="list-style-type: none"> -Protótipos de dimensões reduzidas -Fraco acabamento superficial -Poucas opções de material -Modelo pouco resistente principalmente em espessuras pequenas
Pjet	<ul style="list-style-type: none"> -Bom acabamento superficial -Peças com geometrias complexas -Permite obter modelos translúcidos -Permite a obtenção de elementos encapsulados 	<ul style="list-style-type: none"> -Fracá resistência mecânica -Necessita de pós-processamento para remover os suportes estruturais
Perfactory	<ul style="list-style-type: none"> -Excelente acabamento superficial dos modelos -Tecnologia recente e menos cara -Diversidade de materiais 	<ul style="list-style-type: none"> -Tempo elevado de pré processamento e preparação dos modelos -Elevado tempo de fabrico
SolidScape	<ul style="list-style-type: none"> -Reprodução de pormenores com elevada qualidade nos modelos obtidos -Boa definição superficial 	<ul style="list-style-type: none"> -Elevado tempo de processamento na máquina para fabrico dos modelos -Elevado tempo de pós processamento para obtenção dos modelos acabados

		-Necessita de suportes de apoio durante o fabrico do modelo
Dimension	<ul style="list-style-type: none"> -Possibilidade de montar o equipamento em ambiente de escritório -Possibilidade de mudança de material para produzir protótipos com vários materiais e varias cores -Os protótipos podem ser usados em ensaios funcionais 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessidade de suportes estruturais -Processo lento -Fraco acabamento superficial -Fraca precisão
EBM	<ul style="list-style-type: none"> -As peças obtidas possuem excelentes resistências térmicas e mecânicas -Processo rápido e elevadas taxas de deposição -Ambiente controlado (inexistência de oxidação) -Boa eficiência do feixe (95%) e boa precisão ($\pm 0,4$ mm) 	<ul style="list-style-type: none"> -Só pode utilizar materiais com fusão controlada (pós metálicos por exemplo) -Limitado a materiais condutores -Necessita de vácuo -O feixe de eletrões produz raios gama -Custo elevado do equipamento
Solidica	<ul style="list-style-type: none"> -Obtenção de modelos metálicos -Permite fabrico direto de moldes -Elevada precisão 	<ul style="list-style-type: none"> -Custo do equipamento -Não permite de obtenção de arestas vivas internas

2.10 Pós-processamento dos protótipos obtidos por TDP

Neste capítulo vão ser apresentados os procedimentos mais comuns de pós-processamentos de protótipos obtidos por impressão 3D, nomeadamente da impressora comercializada pela Z Corporation.

Após a impressão estar terminada deve-se manter a máquina ligada por um período de 10 a 60 minutos, dependendo do material utilizado, para se ter a certeza que a peça está completamente seca.

A tampa da máquina terá que permanecer fechada durante esse tempo com o sistema de aquecimento ligado.

De seguida o protótipo é retirado da impressora e passa para a estação de limpeza onde é feita a remoção de pó em excesso na superfície da peça, com ajuda de uma escova e/ou uma pistola de ar comprimido (ZPrinter, 2007).

Depois pode-se optar qual o acabamento/revestimento a dar ao protótipo, dependendo da função e propósito do modelo que se imprimiu. Se não se pretender realizar mais nenhum melhoramento deixa-se o modelo como está, se se pretender melhorar as suas propriedades pode-se realizar uma infiltração ou pintura.

2.10.1 Acabamento do Protótipo Estrutural e Visual

2.10.1.1 Infiltração

Se o protótipo tiver alguma relevância a nível estrutural e visual pode-se realizar uma infiltração. Depois de limpo deixa-se secar ao ar ou num forno ventilado para secar por completo. O tempo de secagem no forno é diretamente proporcional à espessura, uma peça com espessura média de 3,175 mm tem de secar no forno 15 minutos e uma peça de espessura média de 25,4 mm tem de secar durante 90 minutos. A temperatura do forno deve estar entre 70°C a 90°C. A secagem ao ar demora 24 horas. A secagem garante ao modelo uma maior resistência e mais profunda penetração dos agentes que se pretendem infiltrar.

Embora a peça fique com melhores propriedades depois de seca isso pode não ser suficiente quando se pretende um protótipo com bom nível estrutural e visual para fazer uma apresentação.

No fim de seca e arrefecida se se pretender um melhor acabamento superficial pode-se polir o modelo com uma lixa convencional, no fim de realizar o acabamento deve-se fazer uma limpeza final. Qualquer tipo de acabamentos e limpeza final do modelo deve ser realizado nesta fase (Zprinter, 2007).

Seguidamente se se pretender melhorar o especto visual e estrutural opta-se por um impregnamento superficial ou total e uma possível pintura.

Para essa impreganação a Z Corporation dispõem de uma gama própria de produtos destinada aos protótipos concebidos pelas suas impressoras como também pode utilizar outros produtos já existentes no mercado. Esses produtos são Água, Z-Bond™ 90, Z-Bond™ 101, Apollo 5005, Z-Max™ Epoxy e Paraplast X-TRA Wax. Estes produtos podem ser utilizados separadamente, ou combinados dois deles.

Para cada produto é descrita na tabela abaixo a aparência final, resistência, compatibilidade com escritório, o modo de aplicação, a rapidez do processo, o custo e o objetivo de cada produto (3DP Best Practices, 2008).

Revestimento	Aparência	Resistência	Compatibilidade	Aplicação	Rapidez	Custo	Tipo de Protótipo
Água	Boa aparência	Fraca resistência	Compatível com escritório	Gotas Mergulhar	Rápido	Sem Custo	-Protótipo primário -Monocromático
Paraplast X-TRA Wax	Melhor aparência	Fraca resistência	Compatível com escritório	Mergulhar	Rápido	€	-Protótipo primário -Colorido
Z-Bond™ 90	Melhor aparência	Boa resistência	Compatível com escritório	Gotas Mergulhar	O mais rápido	€€€	-Modelos de apresentação -Colorido
Z-Bond™ 101	Melhor aparência	Boa resistência	Compatível com escritório	Gotas Mergulhar	O mais rápido	€€€€	-Modelos de apresentação -Colorido
Apollo 5005	Melhor aparência	Boa resistência	Compatível com escritório	Gotas Mergulhar	O mais rápido	€€€	-Modelos de apresentação -Colorido
Z-Max™ Epoxy	Boa aparência	Melhor resistência	Laboratório	Spray Pincel Mergulhar	Rápido	€€	-Testes funcionais -Ferramentas

Tabela 1 – Diferentes tipos de impregnação superficial

Nenhum destes processos dispensa a utilização de luvas óculos, máscara de proteção e bata de trabalho.

2.10.1.2 Pintura

Os modelos podem ser pintados posteriormente á infiltração para melhorar o acabamento e o especto visual. O fabricante desta máquina recomenda a utilização de um primário, *Dupont Fill 'N Sand Acrylic Primer-Surfacer #131S*, que melhora a adesão de tinta. Este primário pode ser adquirido em qualquer loja de pintura. Depois pode-se pintar com qualquer tinta (ZPrinter, 2007).

2.11 Referências

3D Systems, (2012), “3D Systems Completes The Acquisition Of Z Corp and Vidar”

URL: www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-completes-acquisition-z-corp-and-vidar, consultado em 05-07-2012.

3DP Best Practices, (2008), “3DP Best Practices and User Tips”

URL: http://www.ebookscenter.co.uk/download/3DP-Best-Practices-and-User-Tips-Tech-Ed-Concepts-Architectural-_aHR0cDovL3d3dy50ZWNIZHUUy29tL2RvY3VtZW50cy9OZXdVc2VyV2ViY2FzdF9SZXYxMi5wZGY=, consultado em 05-07-2012.

3DTouch, (2012), “Product Overview”

URL: <http://www.bitsfrombytes.com/eur/catalog/3dtouch>, consultado em 26-07-2012.

Arcam, (2012), “EBM Process”

URL: <http://www.arcam.com/technology/ebm-process.aspx>, consultado em 03-02-2012.

Carlos Relvas, Victor Neto, (2011), “Novas Perspectivas Tecnológicas nos Processos de Conceção e Desenvolvimento”, Capítulo 4, In José Dantas e António Carrizo Moreira, O Processo de Inovação, LIDEL edições técnicas lda, 2011, ISBN: 978-972-757-758-3.

Crump, S. S. (1986 ou 1992), “Apparatus and method for creating three-dimensional objects”, Patente Norte Americana, nº 5 121 329.

Cubify, (2012), “User Guide: The Cube – 3D Printer”

URL: http://cubify.com/data/cube/cube_user_guide.pdf, consultado em 24-07-2012.

Deckard, C. R., (1986), “Method and apparatus for producing parts by selective sintering”, Patente Norte Americana, nº 4 863 538.

Denford, (2012), “3D Printers / Rapid Prototyping”

URL: <http://website.denford.ltd.uk/machines/141-3d-printers>, consultado em 05-09-2012.

Denford, (2012), "The UP! 3D Plus Printer"

URL: <http://website.denford.ltd.uk/news-menu/75-up-printer-news>, consultado em 12-07-2012.

Designjet 3D, (2012), "The HP Designjet 3D Printer"

URL: <http://www.hp3dprinting.co.uk/hp-designjet-color-3d-printer.htm>, consultado em 20-08-2012.

Dimension, (2012), "Dimension Elite Printer"

URL: <http://www.dimensionprinting.com/3d-printers/3d-printing-elite.aspx>, consultado em 03-02-2012.

Engineering.com, (2012), "Is the Stratasys & Objet Merger Good News for Engineers?"

URL: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/4348/Is-the-Stratasys-Objet-Merger-Good-News-for-Engineers.aspx>, consultado em 05-07-2012.

envisionTEC, (2012), "PERFACTORY® - Rapid Manufacturing System - Rapid Prototyping System - Buyers' Guide".

Janice Karin, (2011), "The Future of 3D Printing"

URL: <http://thefutureofthings.com/articles/11106/the-future-of-3d-printing.html>, consultado em 18-07-2012.

Laserlines, (2012), "Dimension Elite"

URL: http://www.3dprinting.co.uk/hm/dim_elite.htm, consultado em 03-02-2012.

Mojo, (2012), "Mojo 3D Printer"

URL: <http://www.mojo3dprinting.com>, consultado em 05-09-2012.

Object, (2012), "Stratasys and Objet agree to combine to create a leader in 3D printing and direct digital manufacturing"

URL: http://www.objet.com/NEWS_EVENTS/Press_Releases/Merger/, consultado em 07-07-2012.

Proto Labs, (2010), "Prototyping Process - Choosing the best process for your project"

URL: http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=proto%20labs%2C%20%282010%29%2C%20%E2%80%9Cprototyping%20process%20-%20choosing%20the%20best%20process%20for%20your%20project%E2%80%9D&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.protolabs.co.uk%2FDocuments%2FUnitedKingdom%2FPrototyping_processes.pdf&ei=isDmUNjPHsXBhAfDiI CoBQ&usq=AFQjCNGFa_TMqJU8LaOult-e-ziCIL0Sjw&bvm=bv.1355534169,d.d2k&cad=rja, consultado em 05-09-2012.

Relvas, C., (2012), "Controlo Numérico Computorizado – Conceitos Fundamentais", 3ª edição, Editora Publindústria.

Solidscape, (2011), "News Release - May 3 2011, Solidscape®, Inc. Sells to 3D Printer Maker, Stratasys",

URL: <http://www.solid-scape.com/press-releases/solidscape-inc-sells-3d-printer-maker-stratasys>, consultado em 05-09-2012.

Ultrasonic Consolidation, (2002), "Appliance Manufacturer", pp. 22-23, 09-2002

uPrint, (2012), "uPrinter"

URL: <http://www.uprint3dprinting.com/default.aspx>, consultado em 05-09-2012

X. Zhang, (2002), "Robotics and Computer Integrated Manufacturing" - Model layout optimization for solid ground curing rapid prototyping processes pp. 41–51

Xue Yan and P Gu, (1996), "Computer-Aided Design". Vol. 28, No. 4, pp. 307-318.

Xue Yan, P. Gu, (1996), A review of rapid prototyping technologies and systems, Computer-Aided Design 28(4), pp: 307-318.

Z Corporation, (2002), "Three-Dimensional Printer", Patente Norte Americana nº 7 037 382.

ZPrinter 150, (2012), "ZPrinter® 150 Professional 3D Printer"

URL: <http://printin3d.com/3d-printers/zprinter-150>, consultado em 20-08-2012

ZPrinter®, (2007), “ZPrinter® 310 Plus - Hardware Manual”, pp.40, 11/12/07

3 Metodologia e estudo realizado

3.1 Materiais e métodos

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia de reconstrução dos modelos CAD 3D gerados, de modo a estabelecer as alterações dimensionais necessárias para garantir a correta adequação funcional das ligações e elementos móveis quando se pretende obter um protótipo técnico-funcional recorrendo à tecnologia de impressão tridimensional disponibilizada pela ZPrinter. Neste sentido para além da análise das alterações dimensionais a impor aos modelos CAD 3D originais, foram ainda analisadas diversas situações de pós-processamento e acabamento dos modelos obtidos, nomeadamente limpeza da superfície, pintura e outros revestimentos. Isto de modo a determinar igualmente a influência do tipo de acabamento ou revestimento da superfície dos modelos, no estabelecimento do grau de ajustamento dos elementos móveis ou funcionais dos protótipos.

O estudo realizado envolveu numa primeira fase o estudo das alterações dimensionais e geométricas em elementos geométricos regulares. Para tal, foram concebidos e realizados um conjunto de provetes cilíndricos de diversas dimensões, macho e cavidade, de modo a determinar os desvios e os diversos tipos de ajustamento. Nesta fase para além das ligações veio/furo, foram igualmente analisadas as ligações roscadas.

A segunda fase de ensaios consistiu em analisar a influência do acabamento e do tipo de revestimento na superfície dos modelos. Para tal, foi concebido um provete com diferentes espessuras e sobre os quais foram aplicados diferentes tipos de revestimento, segundo diversas técnicas e com diferentes número de camadas. Os revestimentos selecionados foram de baixo custo, por comparação às soluções apresentadas pelo fabricante e bastante mais dispendiosas. Pretendeu-se nestes ensaios avaliar, não só qual a melhor técnica alternativa, mas igualmente o grau de fiabilidade da técnica quando aplicada ao acabamento de protótipos técnico-funcionais.

Por fim, os ensaios finais consistiram em validar os resultados anteriormente obtidos, pelo que foi concebido um protótipo técnico-funcional que conjugasse os diferentes tipos de ligação. Registe-se que o protótipo foi concebido para ser fabricado por peças e montado no final, sendo que as ligações e os tipos de ajustamento tiveram que ser previamente calculados e aplicados a cada um dos componentes durante a sua geração em CAD 3D.

3.2 Estudo Prévio

3.2.1 Análise funcional

Os objetos selecionados são elementos simples de fácil design e de fácil medição. As formas selecionadas foram cilindros, que se unem de forma simples e por meio de ranhuras ou roscado. Estes objetos para além de simples continuam a ser constituintes de uma grande parte dos objetos usados em engenharia, sendo assim a importância de estudar estes elementos bastante grande.

Analisar as folgas é a forma que se tem para garantir que o objeto é mecanicamente viável e é aí que este estudo se torna tão importante. Como em todos os processos, a impressão 3D tem os seus erros e quando se imprime um objeto ele pode não ser exatamente como foi planeado, pode não ter a superfície perfeitamente plana ou o diâmetro pode não coincidir com as medidas pretendidas, o que faz com que o modelo no fim não seja funcional. As junções podem não se conectar devido a folgas demasiado baixas ou ter folgas demasiado grandes e ser pouco funcionais também.

3.2.2 Tipos de ligações usadas

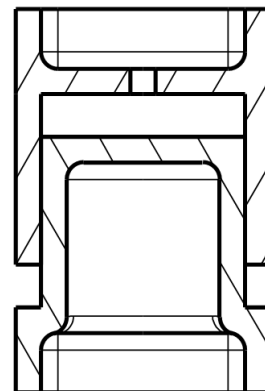
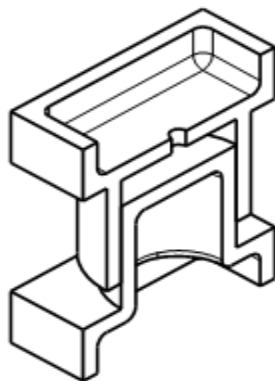


Figura 3.1 – Ligação Cilíndrica Simples

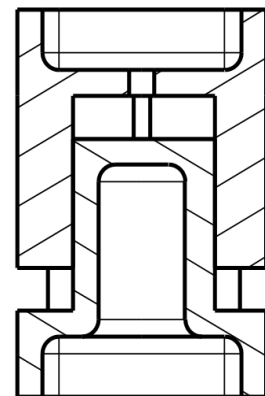
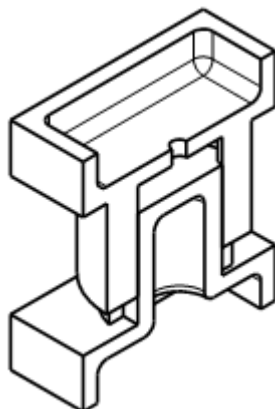


Figura 3.2 – Ligação Cilíndrica Guiada

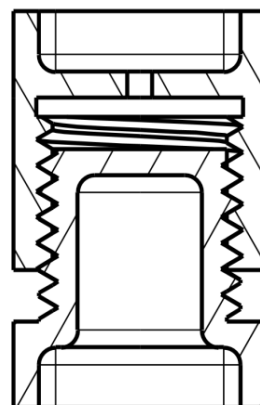
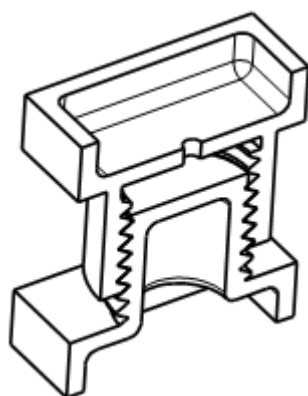


Figura 3.3 – Ligação Roscada

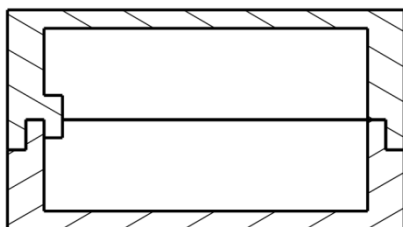


Figura 3.4 – Ligação funcional

3.2.3 Análise dimensional e geométrica

3.2.3.1 Dimensões Lineares

Neste estudo os modelos obtidos (provetes) foram controlados dimensionalmente e analisados os desvios em termos de diâmetros, comprimentos e alturas. O controle dos desvios registados nos diâmetros permitiu-nos tirar conclusões sobre a precisão do equipamento (segundo os eixos X e Y) e a sua evolução segundo a variação deste. A análise dos desvios da altura permitiu-nos tirar conclusões sobre o efeito da deposição de camadas e a precisão segundo o eixo Z.

Diâmetro (\varnothing): O diâmetro é o segmento de reta que passa pelo centro e liga dois pontos opostos sobre um círculo, uma superfície esférica ou uma curva fechada.

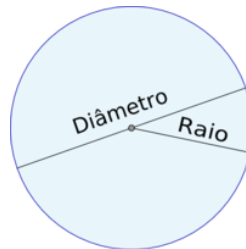


Figura 3.5 – Diâmetro [fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Di%C3%A2metro>]

Altura, comprimento e largura (L): É a grandeza física que expressa a distância entre dois pontos.

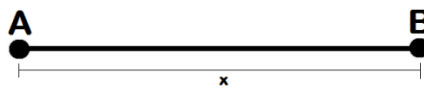


Figura 3.6 – Distância [fonte: <http://minecraftmodding.com.br>]

3.2.3.2 Dimensões geométricas

Em termos de análise geométrica dos modelos foram considerados os aspectos de planeza, circularidade e cilindridade como os mais relevantes, face à tipologia funcional e das ligações dos componentes e às características do próprio processo de impressão tridimensional.

Planeza (∇): É a condição pela qual toda superfície deve estar limitada pela zona de tolerância "t", compreendida entre dois planos paralelos, distantes de "t".

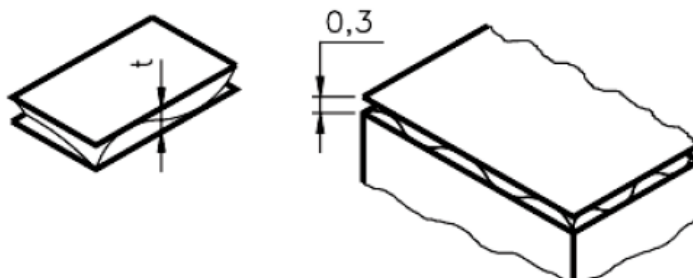


Figura 3.7 – Planeza [fonte: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/c/c1/Metrologia.pdf>]

Circularidade (○): É a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada. O campo de tolerância em qualquer seção transversal é limitado por dois círculos concêntricos e distantes 0,5 mm.

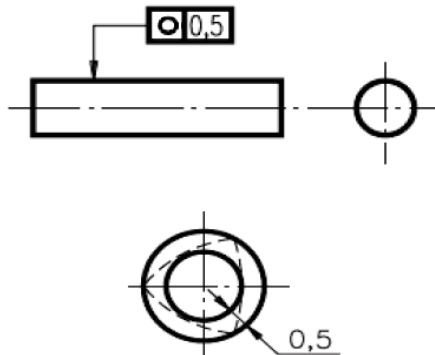


Figura 3.8 – Circularidade [Fonte: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/c/c1/Metrologia.pdf>]

Cilindricidade (⌀): É a condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais.

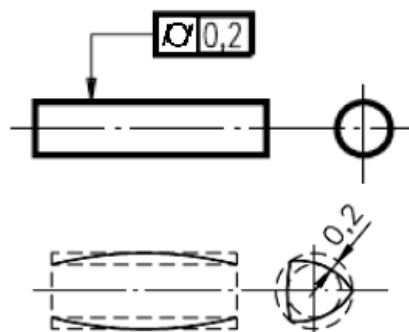


Figura 3.9 – Cilindricidade [fonte: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/c/c1/Metrologia.pdf>]

3.3 Definição dos critérios de análise experimental

Na análise experimental realizada pretendeu-se examinar os elementos funcionais e as ligações de cada objeto impresso por prototipagem rápida, com e sem acabamento superficial. Como também testar provetes com diferentes tipos de acabamento superficial e analisar se esse revestimento altera ou não as dimensões do modelo.

Depois de testados esses revestimentos nos provetes, fizeram-se testes de impregnação dos modelos e posterior análise de alteração de forma e de dimensão.

Este estudo foi realizado em duas fases, mas nas duas fases realizaram-se os mesmo exames e com as mesmas ferramentas, a única variável alterada foi o material de impressão da ZPrinter. Na primeira fase utilizou-se um pó de impressão denominado Zp 130 e resina Zb 58 na segunda fase utilizou-se o pó Zp 150 e resina Zb 58, ambos são consumíveis específicos para este tipo de equipamento.

Inicialmente usou-se o Zp 130, tratava-se de um material mais antigo que o departamento tinha disponível, numa segunda fase utilizou-se pó, o Zp 150, que é um pó mais recente e segundo informação disponibilizada pelo fornecedor (ZCorporation) com melhores propriedades que o Zp 130. O objetivo neste caso consistiu em quantificar em termos dimensionais e geométricos essa melhoria.

No fim da análise pretendeu-se comparar os valores de folga, entre o macho e a fêmea e elementos de encaixe, estabelecendo uma folga na ordem de 0,5 mm, esta folga tanto para modelos com e sem revestimento superficial. Depois comparou-se os valores experimentais obtidos com os valores nominais desenhados em CATIA.

Com esta pesquisa pretende-se prever as adaptações a realizar no modelo CAD para que após o fabrico do modelo este possa ser montado e funcionar de acordo com os ajustamentos previstos e espectáveis.

Também neste estudo foram analisados vários provetes de teste, tanto com o pó Zp 130 como para o pó Zp 150, onde foram aplicados diversos revestimentos com vista a melhorar o aspeto visual e mecânico do objeto. Nesta análise pretendeu-se analisar a deformação e alterações dimensionais que esses revestimentos provocam no provete de testes.

3.4 Modelos de teste

A criação de modelos 3D como em qualquer outro processo de fabrico atual o processo criativo começa com pequenos esboços em papel que rapidamente são transportados para um ambiente de design gráfico 3D, neste caso utilizou-se o software CATIA V5 R19.

Para este estudo foram utilizados como provetes para testes e acabamentos, modelos geométricos simples e com superfícies regulares usando elementos cilíndricos simples e guiados, mas também ligações roscadas, conforme esquema em anexo.

Estes modelos foram pensados de forma a conter uma variedade de junções mecânicas possíveis, não querendo criar algo novo mas sim testar algo existente. Em vários modelos para além da forma foram alteradas as dimensões para tentar perceber qual seria o comportamento da tecnologia com diferentes tipos de detalhe.

Para análise das técnicas de acabamento e revestimento, os provetes criados foram pequenas régua escalonadas com diferentes espessuras e pretendem representar as diferentes espessuras de parede dos modelos obtidos por impressão 3D, começando com uma espessura mínima da 1 mm e até uma espessura de 5 mm. Com essa régua pretendeu-se perceber e validar em que camadas o revestimento alteraria ou não a forma e as dimensões da parede. Como alteração de forma, entende-se, se o revestimento

degradaria, por erosão ou empeno a forma do objeto original, impossibilitando este de ser funcional.

Com os restantes modelos, pretendia-se validar as dimensões lineares e geométricas do modelo.

Para analisar os diâmetros, os comprimentos (e alturas), as planezas, circularidades e cilindridades foram usadas as junções cilíndricas simples, cilíndricas guiadas e roscadas, e analisadas na máquina de medição por coordenadas, Aberlink Maxim.

Com os valores obtidos desses modelos pretendeu-se validar a precisão funcional da tecnologia ZPrinter e o tipo de desvio que advém da impressão. Em todos esses modelos, exceto na junção roscada que não se consegue obter com tanta precisão o diâmetro, podemos avaliar e validar todas as dimensões pretendidas.

Para testar os acabamentos superficiais nas junções, utilizaram-se as junções cilíndricas simples e roscadas onde foi aplicada uma camada do revestimento. Avaliou-se as folgas obtidas e validou-se se a junção continuava funcional e com o ajustamento pretendido. No modelo de ligação roscada a avaliação da funcionalidade é apenas empírica devido à dificuldade em realizar medições em objetos roscados.

Numa fase posterior e depois de testados os modelos mais simples foi projetado um modelo funcional com um mecanismo mais complexo que englobasse todos os detalhes utilizados nos modelos mais simples, de modo a simular mecanismo técnico-funcional de um modelo/protótipo e que possa ser obtido diretamente através de uma impressora 3D (figuras apresentadas).

3.4.1 Geometrias dos modelos de teste

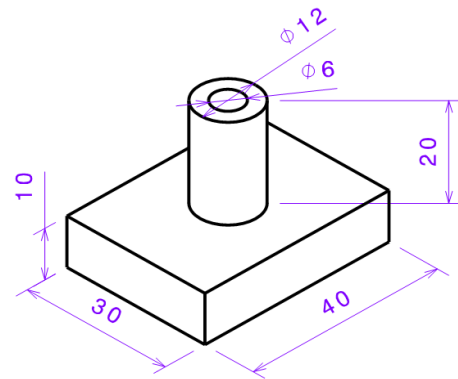
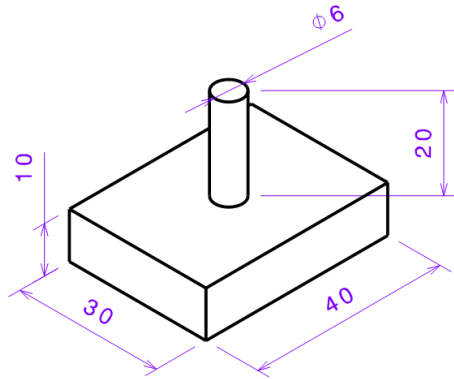


Figura 3.12 – Junção Cilíndrica Simples Ø6 – Macho e Fêmea

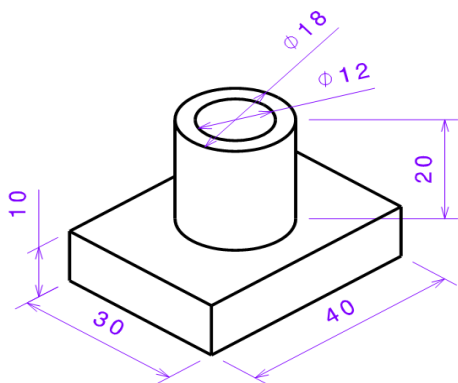
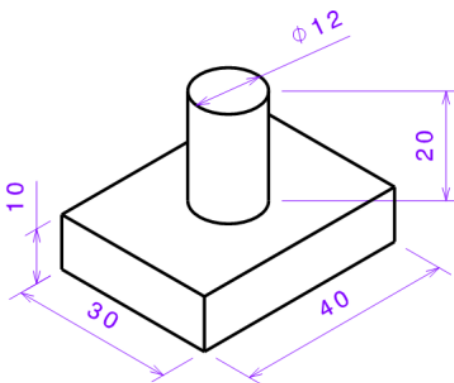


Figura 3.14 – Junção Cilíndrica Simples Ø12 – Macho e Fêmea

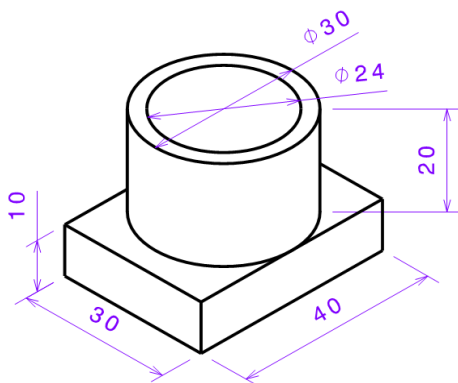
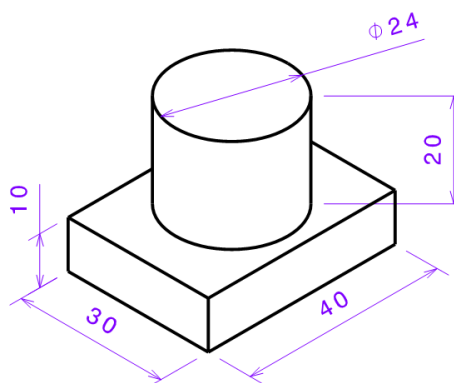


Figura 3.16 – Junção Cilíndrica Simples Ø24 – Macho e Fêmea

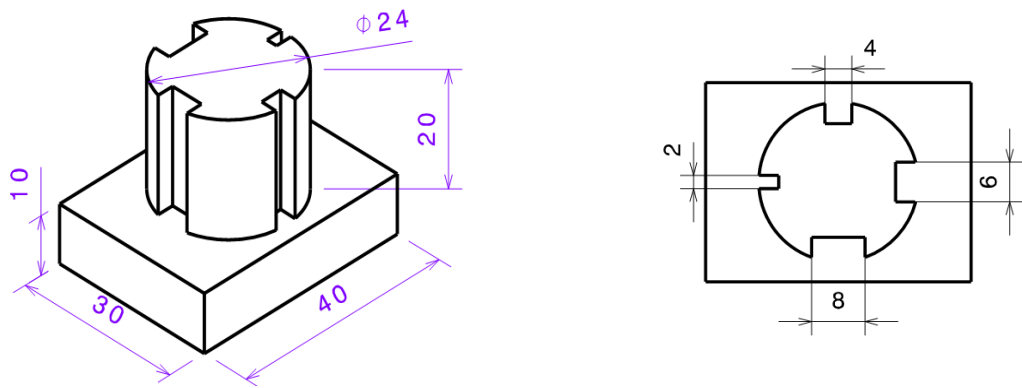


Figura 3.18 – Junção Cilíndrica Guiada Ø24 - Macho

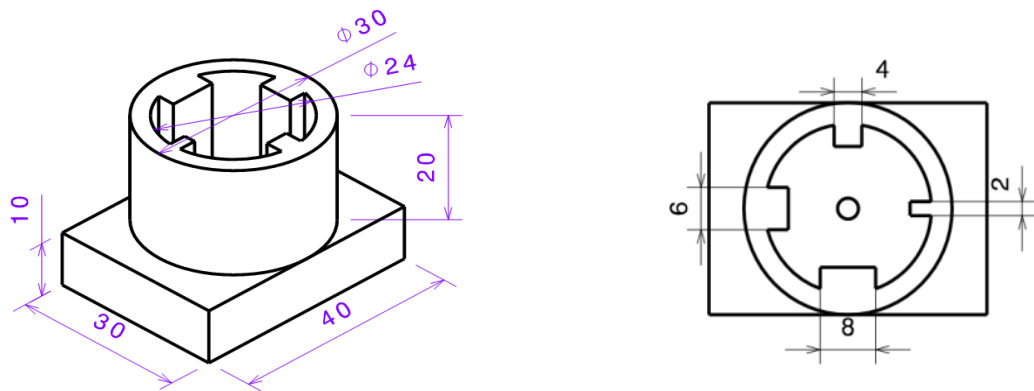


Figura 3.19 – Junção Cilíndrica Guiada Ø24 - Fêmea

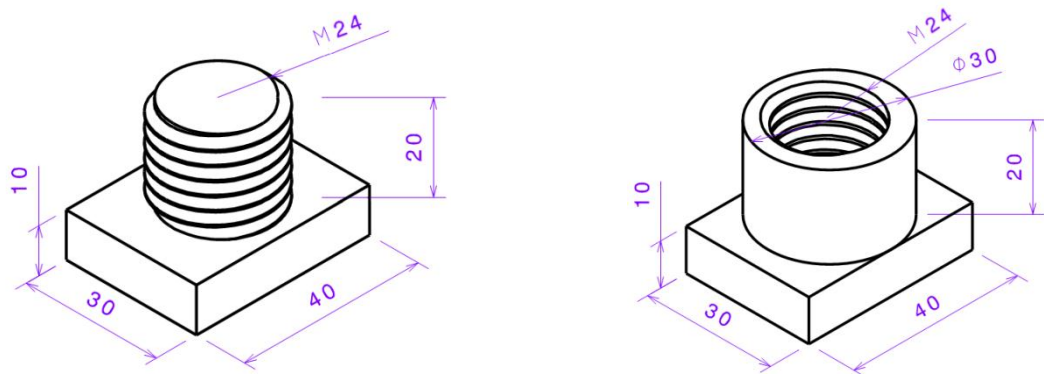


Figura 3.16 – Junção Cilíndrica Roscada Ø24 – Macho e Fêmea

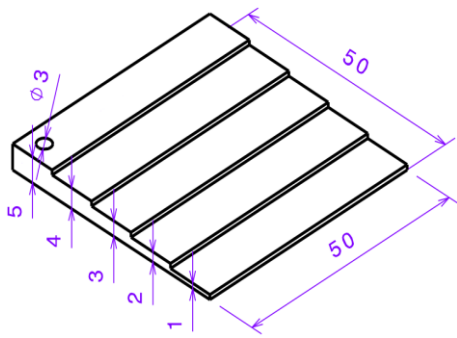


Figura 3.20 – Provete escalonado para acabamentos superficiais

3.5 Equipamento utilizado para obtenção dos modelos

3.5.1 Especificações da ZPrinter 310 Plus ®

No estudo realizado utilizou-se a ZPrinter® 310 Plus, cujas características e especificações seguem abaixo.



Figura 3.11 – Zprinter 310 Plus [fonte: <http://souvsophie.blog.com/2009/12/15/z-corp-zprinter-310-plus/>]

Características:

- Cor: Monocromática • Resolução: 300 x 450 dpi
- Velocidade de construção vertical: 1,0 polegadas / hora (25 mm / hora)
- Tamanho de construção: 8 x 10 x 8 polegadas (203 x 254 x 203 mm)
- Opções de Material: *High Performance Composite*, *Fundição Direct*, elastômeros, fundição de precisão
- Espessura da camada: 0,0035-0,008 polegadas (0,089-0,203 mm)
- Número de jatos: 304

Especificações:

- Formatos de arquivos para impressão: STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR
- Dimensões do equipamento: 29 x 34 x 43 polegadas (737 x 863 x 1067 mm)
- Equipamentos Peso: 255 lbs (115 kg)
- Compatibilidade: Windows ® 7, Windows ® XP Professional e Windows Vista ® Business / Ultimate
- Conformidade Regulatória: CE, CSA.

Observações adicionais:

Para um bom funcionamento da máquina é necessário obter uma temperatura na faixa dos 2 a 26°C. A humidade relativa do ar deve ser entre 20 e 60%. Deve-se manter o equipamento sempre limpo. A Zprinter 310 Plus, pode obter precisões de dimensões entre 96 a 97% (Prototipagem, 2012).

3.5.2 Comparação do pó utilizado na ZPrinter – Zp 150 vs pós anteriores

O pó Zp 150 é o melhor sistema de pó disponível atualmente para impressoras da Z Corporation. Apresenta melhorias significativas em relação a materiais comercializados anteriores, tanto na aparência como em resistência e oferece a versatilidade de ser o novo padrão em materiais de impressão 3D.

Melhor Cor e Brancura:

Brancos mais brilhantes - 90% mais brancos do que Zp 131.

Maior gama de cores - 125% maior que Zp 131.

Novo modo HD de impressão a cores para a ZPrinter® 650.

Maior resistência.

Melhor resistência verde do que com zp 130 e Zp 131.

É 40% mais forte com Z-Bond™ 101 sobre Zp 130.

É 100% mais forte com infiltração de água do que o Zp 140.

Nova opção de acabamento – Infiltração com água com sal Epsom.

Fácil e *user-friendly* - apenas água e sal são necessários para selar e fortalecer a sua impressão.

Funciona com modelos a cores.

Grande Versatilidade - Um pó para todas as aplicações.

Compatível com cura de água, cera, Z-Bond™ e Z-Max™ (Zp 150, 2009).

3.6 Realização dos ensaios experimentais

3.6.1 Fabrico e obtenção dos modelos para ensaio

Para projetar os modelos 3D foi utilizado o CATIA V5. Sendo que estes modelos tiveram que ser convertidos em formato .stl, pois é esse o formato compatível com as impressoras 3D atuais. Neste trabalho foi utilizada a impressora ZPrinter 310 Plus da Z Corporation, impressora esta que é um equipamento de gama média, que imprime num pó compósito e apenas numa cor. Na primeira fase do estudo utilizou-se o pó Zp 130 e Zb 58 e na segunda fase o estudo utilizou-se o pó Zp 150 com a resina Zb 58. Utilizando o software disponibilizado com a impressora, o ZPrint 7.10, O processo iniciou-se com a importação o ficheiro .stl da peça pretendida, fizeram-se os posicionamentos e rotações necessários no tabuleiro de impressão e iniciou-se o fabrico. Para a impressão de modelos nas duas fases foram adotadas espessura de camada de 0,0875 mm.

Depois de impressão da peça, esta foi removida da impressora e limpa, essa limpeza foi realizada no equipamento especializado para o efeito, o ZD5 Powder Recycle Station.

Devido à fraca resistência mecânica apresentada pelos modelos impressos com o pó Zp 130 após impressão procedeu-se a um cozimento das peças no forno, para remover o excesso de humidade, tendo em conta os tempos específicos para a espessura dos modelos obtidos.

3.6.2 Acabamento superficial dos modelos obtidos

Como em vários processos de prototipagem depois de impressão deve-se proceder a um acabamento superficial inicial, para se retirar todo o material em excesso e garantir que só se tem o objeto pretendido. Este passo não é apenas estético mas também funcional, pois com material a mais a função e as folgas pretendidas podem não estar garantidas.

Esse acabamento superficial pode ser feito com uma lixa simples ou com algum abrasivo ligeiro, apenas o suficiente para remover uma leve camada de material em excesso deixada pelo processo de impressão. Nunca se deve remover material de mais pois assim poderá se estar a perder as dimensões pretendidas do objeto.

Neste ensaio experimental, tanto na 1ª fase como na 2ª todas as peças foram polidas com uma lixa fina e depois limpas com um jacto de ar.

3.6.3 Aplicação de revestimentos

Este estudo foi dirigido também para as possíveis alterações que poderiam ocorrer ao nível dimensional quando à realização de um acabamento superficial, pois, no mundo empresarial atual não basta obter um modelo impresso simples para mostrar um potencial novo produto mas também o seu aspeto estético e estrutural é cada vez mais um requisito pretendido.

Dai uma parte deste estudo ser focada na procura e examinação dimensional de impregnantes alternativos de baixo custo, que podem ser adquiridos facilmente e que podem garantir as mesmas propriedades visuais finais, sem alterar as características do objeto, que outros produtos recomendados pelos fabricantes de impressoras, que geralmente são mais dispendiosos e difíceis de comprar. Produtos esses que já referidos anteriormente.

3.6.3.1 Revestimentos e impregnantes utilizados

Estes impregnantes podem ser administrados de varias formas, por pincel, por imersão ou por spray. Neste estudo utilizaram-se esses três métodos de impregnação, pulverização (spray), pincelagem e imersão.

a) Pó Zp 130:

Impregnante	Cor	Método de aplicação
Tinta Acrílica	Verde	Pincelagem e imersão
Tinta Spray	Magenta	Spray
Verniz de Madeira	Translucido	Pincelagem e imersão
Cola Transparente (Goma Arábica)	Transparente	Pincelagem
Cola Branca	Branco	Pincelagem

b) Pó Zp 150:

Impregnante	Cor	Método de aplicação
Tinta Acrílica	Verde	Pincelagem
Tinta Spray	Magenta	Spray
Verniz de Madeira	Translucido	Pincelagem
Cola Transparente (Goma Arábica)	Transparente	Pincelagem
Verniz em Spray	Translucido	Spray
Água	Transparente	Spray

3.6.4 Controlo dimensional e geométrico dos modelos

3.6.4.1 Equipamento utilizado para a medição

Para a medição dos modelos e dos provete usados neste estudo foi utilizado o equipamento Aberlink Maxim, com uma cabeça de medição Renishaw TP20.

Especificações do equipamento:

Descrição - Maxim CNC CMM (máquina de medição coordenadas)

Construtor - Aberlink

Modelo - Maxim

Capacidade de medida - 600 x 500 x 400mm

Software de medida - Aberlink 3D CNC V30.25

Cabeça - Renishaw TP20

Número de eixos - 5

Tipo de Rolamento - Ar

Tipo de construção – Torre

Material de construção - Alumínio

Precisão - 5 + 5L/1000

Repetibilidade - 5 micron

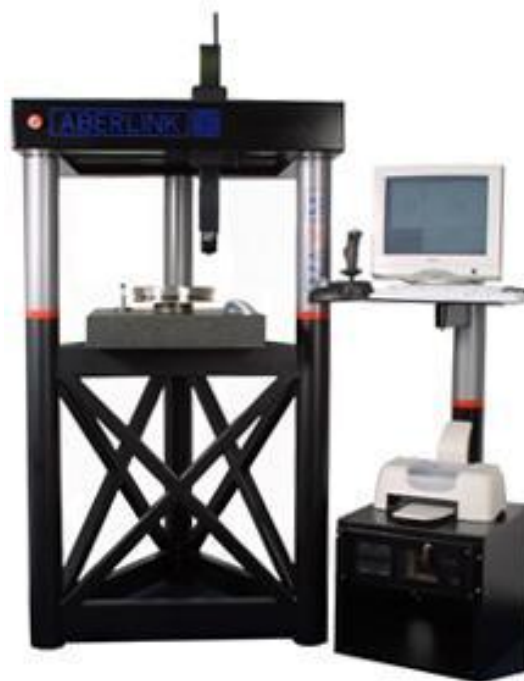


Figura 3.21 – Aberlink Maxim [fonte: http://www.hellopro.co.uk/Aberlink_Ltd-10157-noprofil-1001251-47347-0-1-1-fr-societe.html]

3.6.4.2 História da empresa Aberlink

A Aberlink pode ser descrita como uma história notável de sucesso em metrologia.

Desde o lançamento da sua primeira máquina de coordenadas de medição a Aberlink ganhou uma reputação global na produção de uma gama de custo/eficácia de CMM (Coordinate Measuring Machine - Máquina de Medição de Coordenas) e sistemas óticos de medição que são conhecidos internacionalmente por causa da sua qualidade, precisão, velocidade, robustez e acima de tudo por ser extremamente simples de usar.

Agora são a opção de escolha, em medição, para empresas de grande e pequeno porte em todo o mundo, a sua gama extremamente abrangente de CMM e sistemas óticos de medição são extensivamente usados em sectores de mercado exigentes, como aeroespacial, automóvel, eletrônica e indústria médica, campos críticos de segurança onde a precisão é um pré-requisito. Para além da reputação que detêm no mercado doméstico, a sua posição global crescente significa que exportam atualmente uns notáveis de 81% da sua produção. Como os seus produtos são vendidos em praticamente todos os países em todo o mundo industrializado, a empresa garante que sua extensa rede de agentes no exterior é capaz de proporcionar níveis de serviço e formação para acompanhar a alta qualidade dos seus produtos.

O seu entendimento das necessidades de medição da indústria global tem assegurado um fluxo constante de lançamentos de produtos comerciais de sucesso da empresa. Uma compreensão profunda dos princípios de projeto para manufatura, o uso de materiais avançados e uma abordagem inovadora para a metrologia ajuda a sua equipa de design a oferecer grande velocidade de operação e precisão impressionante e grande repetibilidade. Como os seus clientes são os consumidores mais exigentes do mundo, a sua equipa de trabalho qualificada permanecer empenhada em produzir produtos da mais alta qualidade possível.

Motivada pela crescente demanda global para a sua gama de alta qualidade CMM e sistemas óticos de medição, Aberlink mudou em abril de 2008, para uma instalação de fabrico moderno. Quadruplicaram a área de produção, a nova e avançada instalação de fabrico Aberlink vai permitir um salto qualitativo na capacidade de produção. A nova sede da Aberlink mais espaçoso irá incorporar, instalações de escritórios modernos, um grande showroom e centro de formação. Com o iminente lançamento de novos produtos, o crescimento contínuo desta história de sucesso parece assegurada.

3.6.4.3 Controlo dimensional e geométrico dos modelos

A medição dos modelos foi realizada recorrendo ao equipamento Aberlink Maxim (Aberlink, Gloucestershire, England) e usando o software próprio da máquina Aberlink 3D.

Os modelos foram medidos sempre na mesma posição, recorrendo ao um sistema de apoios instalado na mesa de trabalho do equipamento de medição. Tentando assim

garantir que as medições eram realizadas sempre no mesmo sistema de eixos e sempre na mesma direção de impressão do objeto.



Figura 3.22 – Medição dos modelos

Para todas as medições foram realizadas três repetições que foram usadas para obter uma média de valores para cada ensaio realizado, antes e depois de impregnadas. Esses valores foram tratados para que no fim se pudesse comparar com o valor nominal, do modelo criado no CATIA. Podendo assim tirar conclusões relativamente á precisão de impressão da impressora ZPrinter e quais são os erros associados ao equipamento.

Depois de comparados aos valores nominais examinaram-se as folgas de cada conjunto (macho e fêmea) e determinou-se se a folga entre eles era demasiado baixa ou demasiado alta para ser funcional.

3.7 Resultados obtidos

Relativamente aos provetes, na primeira fase (com o pó Zp 130) foram realizadas medições após aplicação da primeira, segunda e quarta camada de revestimento. Nessas medições comparam-se a altura do provete, degrau a degrau, comparando sempre com os valores obtidos sem revestimento com a primeira, segunda e quarta demão de revestimento.

Na segunda fase (com o pó Zp 150) apenas se realizaram medições após a segunda de mão, pois concluiu-se, mais do que essas duas camadas de revestimento o processo de acabamento torna-se demorado, e logo, pouco produtivo. Nesta fase também se comparou os valores obtidos degrau a degrau, antes e depois do revestimento.

3.7.1 Resultados obtidos na 1ª fase – pó Zp 130

Na primeira fase analisaram-se vários provetes para testar os vários revestimentos selecionados para este estudo e também vários modelos de ligação cilíndrica simples com as medidas nominais importadas diretamente do programa CAD no primeiro ensaio e depois com algumas alterações nos ensaios seguintes.

1º Ensaio - Análise ao Ø24 mm

2º Ensaio - Análise ao Ø6, Ø12 e Ø24 ± 0.25 mm

3º Ensaio - Análise ao Ø6 Ø12 Ø24 ± 0.25 mm

4º Ensaio - Análise ao Ø12 e Ø24 ± 0.15 mm

Nesta primeira fase e como referido anteriormente também foram impressas junção cilíndrica guiadas e roscadas, mas devido à dificuldade em apresentar resultados, esses conhecimentos vão ser empírico. Mas não se pode desprezar a sua utilidade, pois se se estudar o modelo cilíndrico simples e se se obter o valor das folgas e alterações a realizar, nos outros modelos terá que ser a mesma folga, assim imprime-se outros modelos com essas alterações e valida-se se realmente a folga obtida é genérica para todos os objetos possíveis.

3.7.1.1 Análise de desvios dos modelos – Diâmetros

Na análise de folgas neste estudo pretende-se garantir uma folga de 0,50 mm, para que este possa ser considerado funcional, sem folga excessiva, nem folga apertada.

No primeiro ensaio analisou-se um modelo de junção cilíndrica simples com as dimensões nominais importadas diretamente do programa CAD.

Realizaram-se então a medição da junção cilíndrica com o valor nominal de Ø24 mm sem qualquer tipo de revestimentos, com os seguintes resultados.

a) Análise de desvios face ao valor nominal

RESULTADOS OBTIDOS NO 1º ENSAIO (Ø24 mm)

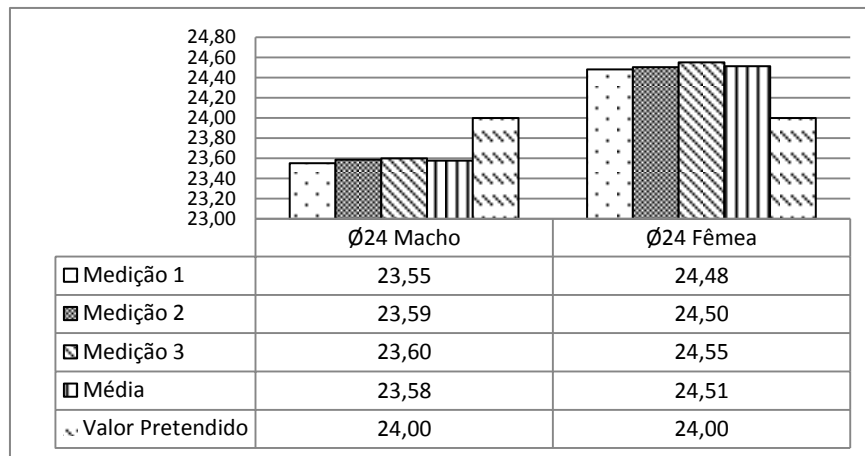


Gráfico 3.1 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø24 – 1ª Fase - 1º Ensaio

Na primeira análise conclui-se que a folga era demasiado grande, com um valor de 0,93 mm.

Para o segundo ensaio face aos resultados obtidos realizaram-se alterações no modelo CAD, onde se diminuiu 0,25 mm ao diâmetro da fêmea e aumentou 0,25 mm ao diâmetro do macho.

Imprimiram-se modelos das junções cilíndricas simples, guiadas e roscado já com as alterações de $\pm 0,25$ mm feitas no modelo CAD. As junções cilíndricas simples foram impressas com três dimensões distintas, Ø6, Ø12 e Ø24 mm já com as novas alterações de folga também. Como a junção simples é a mais relevante e fácil de analisar quanto às dimensões de folgas obtidas, os resultados seguintes são apenas relativos a essa junção.

b) Análise de desvios para uma folga projetada de 0,5 mm

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO (Ø6 mm)

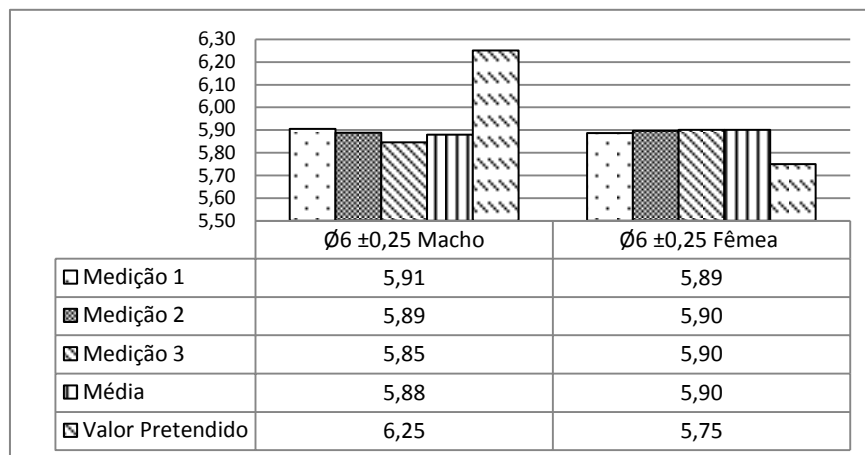


Gráfico 3.2 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø6 ±0.25 – 1ª Fase - 2º Ensaio

Para o $\varnothing 6 \pm 0.25$ mm a folga obtida foi de 0,02 mm o que é uma folga demasiado apertada, impossibilitando a montagem do objeto.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO ($\varnothing 12$ mm)

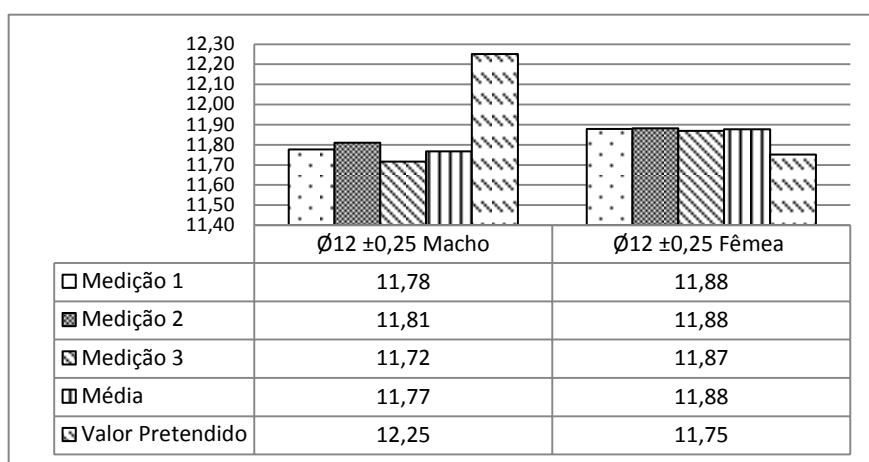


Gráfico 3.3 – Diâmetro do Macho e Fêmea $\varnothing 12 \pm 0.25$ – 1ª Fase - 2º Ensaio

Neste ensaio com $\varnothing 12 \pm 0.25$ mm a folga voltou a ser apertada com um valor de 0,11 mm apenas.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO ($\varnothing 24$ mm)

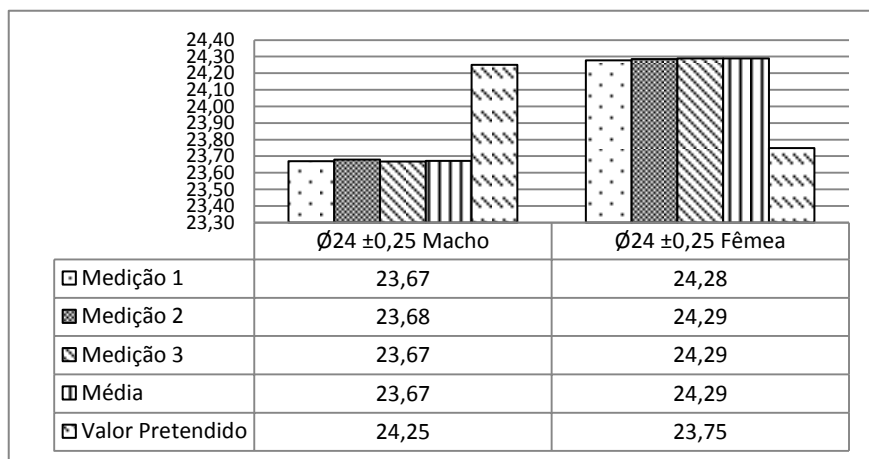


Gráfico 3.4 – Diâmetro do Macho e Fêmea $\varnothing 24 \pm 0.25$ – 1ª Fase - 2º Ensaio

Neste caso com o diâmetro de 24 ± 0.25 mm a folga foi de 0,62 mm o que nem é um valor longe do pretendido, mas nesta caso essa folga apenas se verificou devido ao desgaste

excessivo infligido na junção, quando se forçou a união dos componentes. Em condições normais o valor da folga seria idêntico aos obtidos nos outros componentes deste ensaio.

Realizou-se um terceiro ensaio com os mesmos valores e com alteração de ± 0.25 para tentar perceber se teria sido um erro da impressora, porque esta esteve sem uso algum tempo. Os resultados foram os seguintes.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO ($\varnothing 6$ mm)

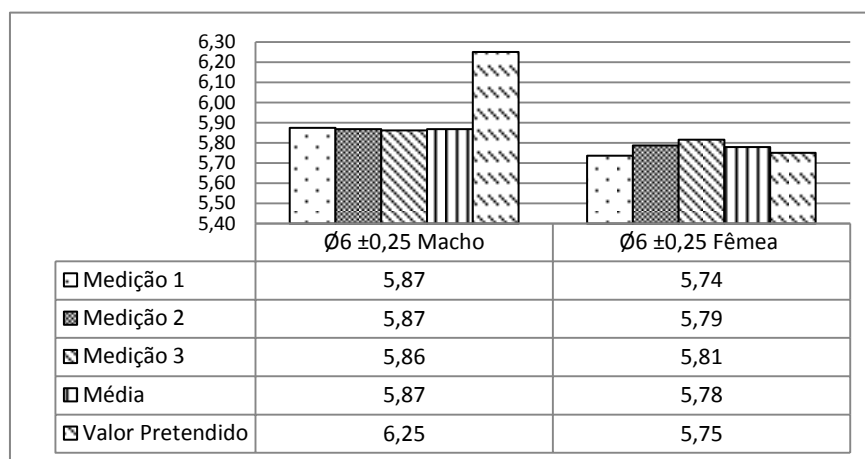


Gráfico 3.5 – Diâmetro do Macho e Fêmea $\varnothing 6 \pm 0.25$ – 1ª Fase - 3º Ensaio

Neste ensaio de $\varnothing 6 \pm 0.25$ mm obteve-se uma interferência de 0,09 mm.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO ($\varnothing 12$ mm)

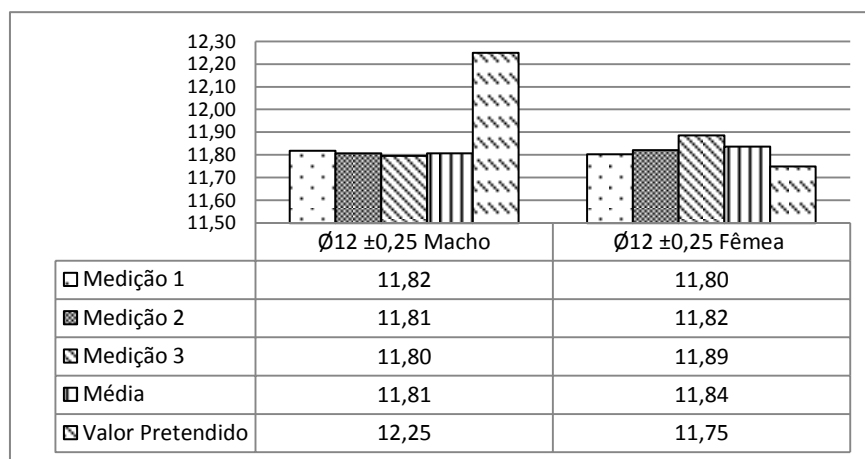


Gráfico 3.6 – Diâmetro do Macho e Fêmea $\varnothing 12 \pm 0.25$ – 1ª Fase - 3º Ensaio

Neste ensaio a folga obtida de 0,03 mm.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO (Ø24 mm)

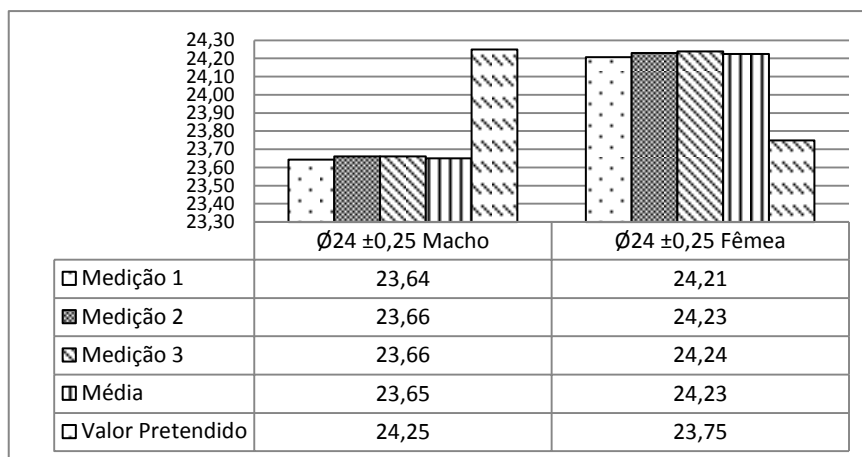


Gráfico 3.7 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø24 ±0.25 – 1ª Fase - 3º Ensaio

Novamente neste caso do Ø 24 ±0.25 mm, a folga foi de 0,58 mm que atestou ser devido ao desgaste excessivo na junção.

Com estes dois ensaios (2º e 3º ensaios) conclui-se então que as alterações feitas nos modelos CAD, de ±0,25 mm, não garantem a folga pretendida de 0,5 mm. Mas sim diminuem drasticamente a folga da junção.

c) Análise de desvios para uma folga projetada de 0,3mm

No quarto ensaio realizaram-se novas alterações de ±0,10 mm e ±0,15 mm, nos modelos de Ø12 e Ø24 onde se concluiu que com ±0,15 mm se obteriam melhores valores de folga, como se observa nos gráficos abaixo apresentados.

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO (Ø12 mm)

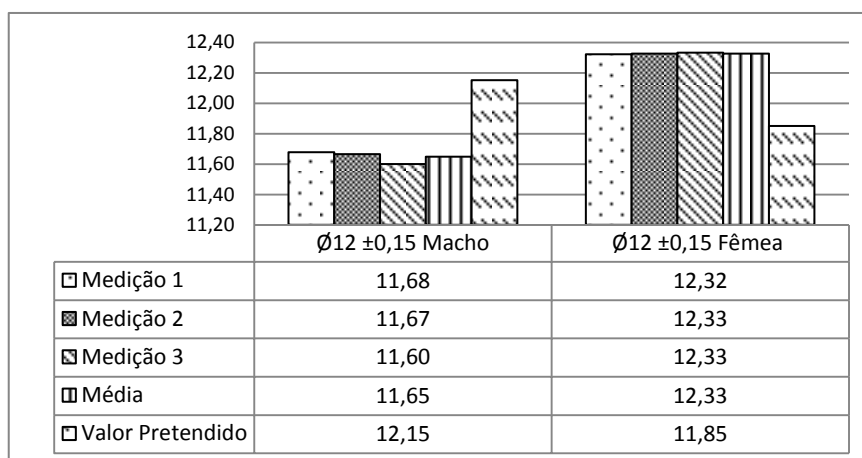


Gráfico 3.8 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø12 ±0.15 – 1ª Fase - 4º Ensaio

Como se pode verificar neste ensaio a folga foi de 0,68 mm, valor este que se aproxima mais com o valor pretendido.

No próximo gráfico são apresentados os valores de $\varnothing 24 \pm 0.15$ mm.

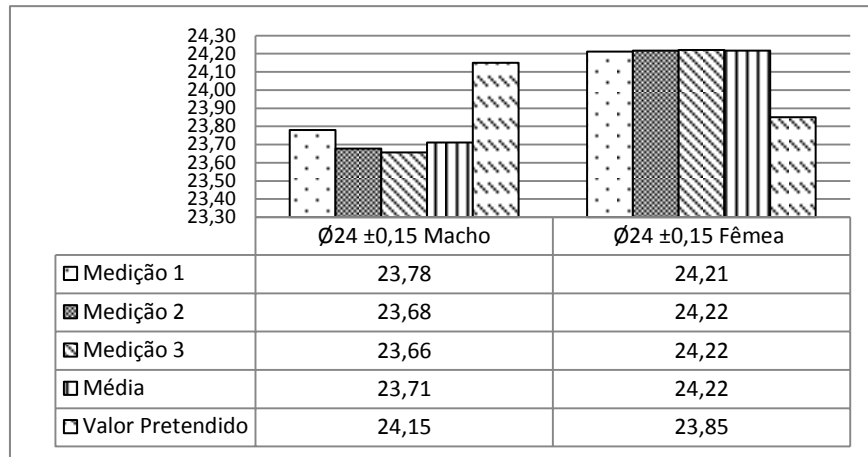


Gráfico 3.9 – Diâmetro do Macho e Fêmea $\varnothing 24 \pm 0.15$ – 1ª Fase - 4º Ensaio

No último gráfico, referente ao quarto ensaio obteve-se um valor de folga de apenas 0,51 mm o que é um valor perfeito em termos de folga pretendida.

3.7.1.2 Análise de desvios dos modelos – Alturas

O valor da altura final dos modelos impressos foi também alvo de análise, obtendo os seguintes valores.

RESULTADOS OBTIDOS NO 1º ENSAIO (20 MM)

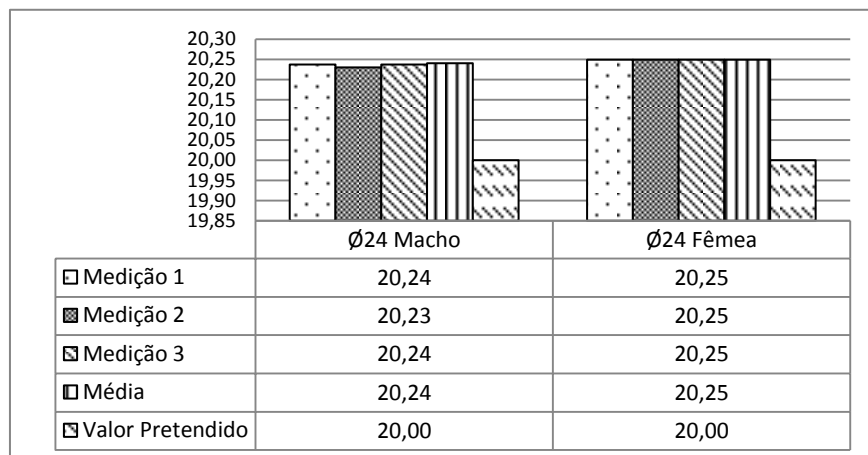


Gráfico 3.10 – Altura do Macho e Fêmea – 1ª Fase - 1º Ensaio

Neste ensaio obteve-se um valor de altura para ambos os componentes em média de mais 0,25 mm em relação ao valor da cota nominal de 20 mm.

Em seguida são apresentados os valores obtidos do segundo ensaio.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

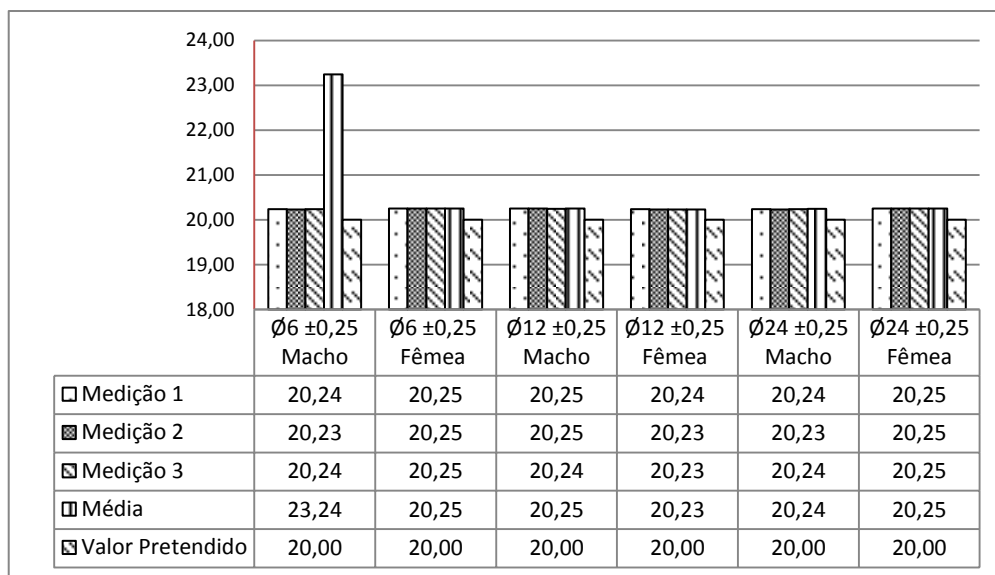


Gráfico 3.11 – Altura do Macho e Fêmea com ±0.25 – 1ª Fase - 2º Ensaio

Com os resultados obtidos percebe-se que ambos os componentes divergem em média 0,24 mm do valor pretendido.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

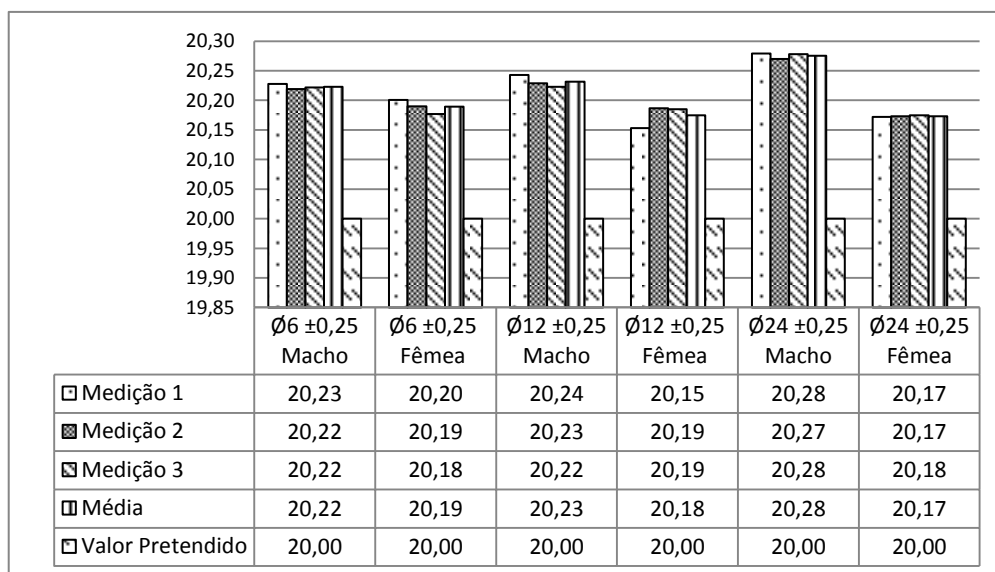


Gráfico 3.12 – Altura do Macho e Fêmea com ±0.25 – 1ª Fase - 3º Ensaio

Com os resultados obtidos percebe-se que os modelos divergem também 0,21 mm do valor pretendido.

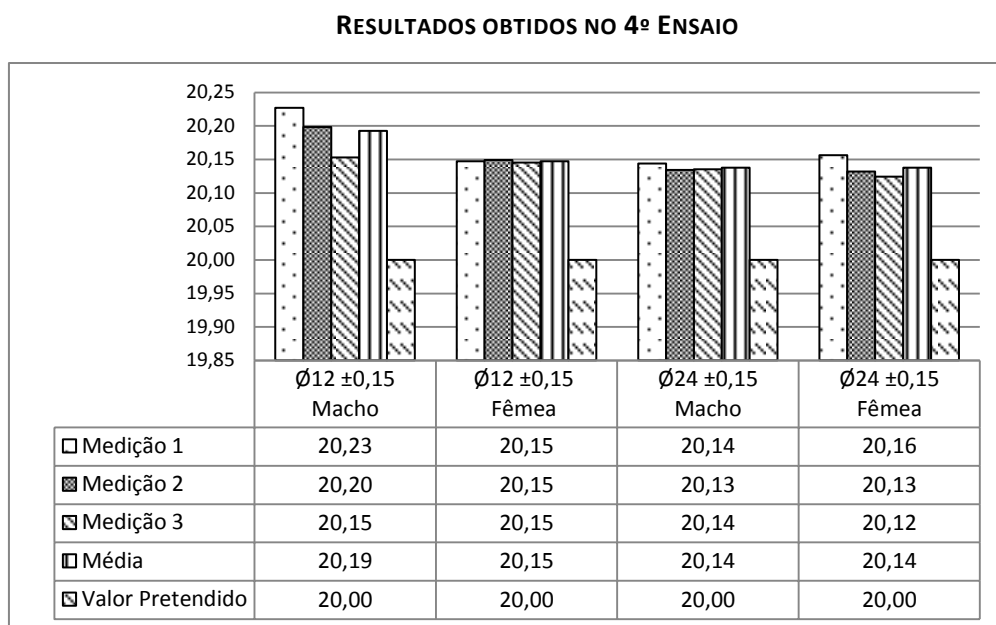


Gráfico 3.13 – Altura do Macho e Fêmea com ±0.15 – 1ª Fase - 4º Ensaio

Neste ensaio o valor médio da altura dos quatro componentes excede em 0,16 mm a altura pretendida dos modelos.

Da análise dos últimos quatro gráficos observa-se um excesso de altura dos modelos obtidos, com valores que variam entre os 0,16 e 0,25 mm.

3.7.1.3 Análise da circularidade

O valor da circularidade que garante uma qualidade aceitável (ISO 2768-2 mK) para o toleranciamento geral em objetos cilíndricos deve igual à tolerância dimensional, mas inferior à tolerância de batimento. Neste caso a tolerância máxima para o Ø6 mm é de, 0,2 mm e para Ø12 e Ø24 mm é 0,4 mm. Nos gráficos seguintes analisaram-se os valores e comparou-se com o valor pretendido.

O primeiro ensaio consistiu na análise de circularidade macho-fêmea para Ø24 mm cujos resultados são apresentados no gráfico que se seguem.

RESULTADOS OBTIDOS NO 1º ENSAIO

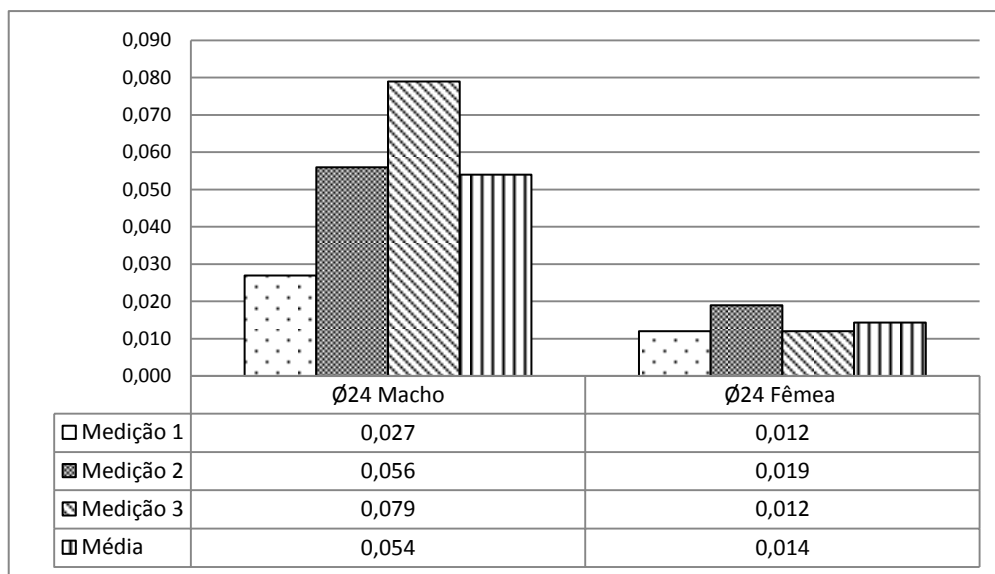


Gráfico 3.14 – Circularidade do Macho e Fêmea Ø24 – 1ª Fase - 1º Ensaio

Neste ensaio os valores médios variam entre 0,014 e 0,054 mm o que é um valor de toleranciamento válido para uma qualidade ISSO 2768-2 fH.

No segundo ensaio apresentam-se os valores para o Ø6, Ø12 e Ø24 $\pm 0,25$ mm.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

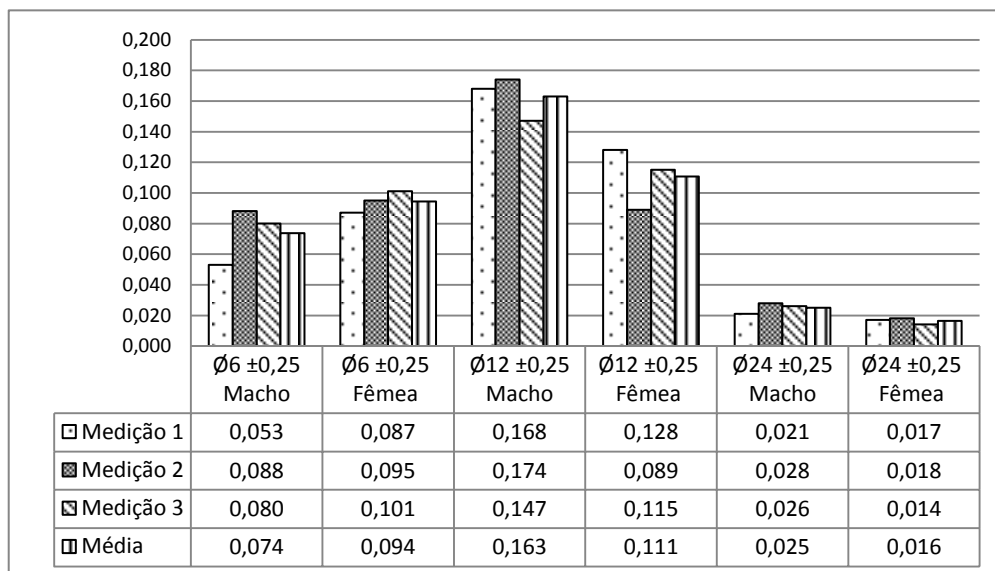


Gráfico 3.15 – Circularidade do Macho e Fêmea com $\pm 0,25$ – 1ª Fase - 2º Ensaio

Os valores médios variam entre 0,016 e 0,163 mm o que está abaixo dos máximos pretendidos.

Seguem-se os valores obtidos no terceiro ensaio.

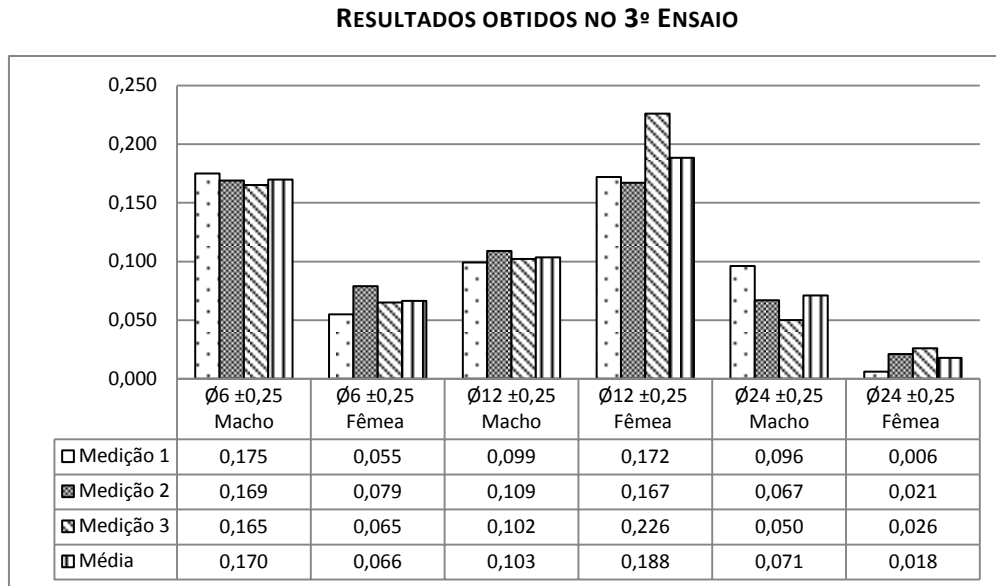


Gráfico 3.16 – Circularidade do Macho e Fêmea com ± 0.15 – 1ª Fase - 3º Ensaio

Valores médios apresentados variam entre 0,018 e 0,188 mm.

Por fim são apresentados os valores para o último ensaio.

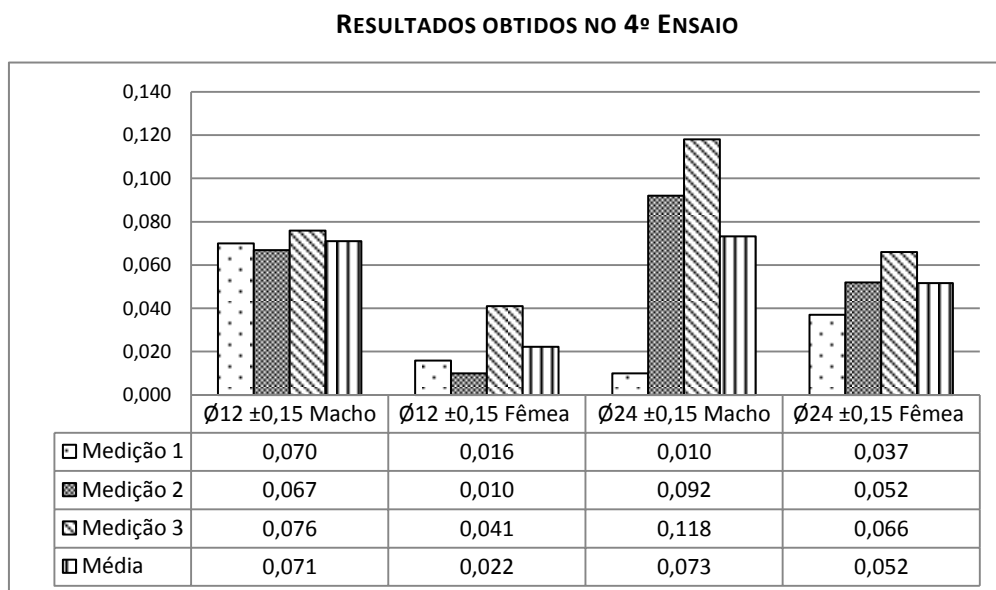


Gráfico 3.17 – Circularidade do Macho e Fêmea ± 0.15 – 1ª Fase - 4º Ensaio

Como se pode observar nos quatro gráficos acima apresentados (gráfico 3.14 ao 3.17) as médias de circularidades obtidas variam entre 0,014 e 0,188 mm os quais são valores maioritariamente abaixo dos máximos pretendidos, indicando que a impressora tem uma boa tolerância em termos de circularidade.

3.7.1.4 Análise da cilindridade

Para a cilindridade não são prescritas tolerâncias gerais, estas resultam da combinação da tolerância de circularidade com a tolerância de rectitude.

Na análise da cilindridade para o Ø24 mm segundo a ISO 2768-2 mK o valor da tolerância é 0,4 mm.

Em baixo apresentam-se os resultados obtidos.

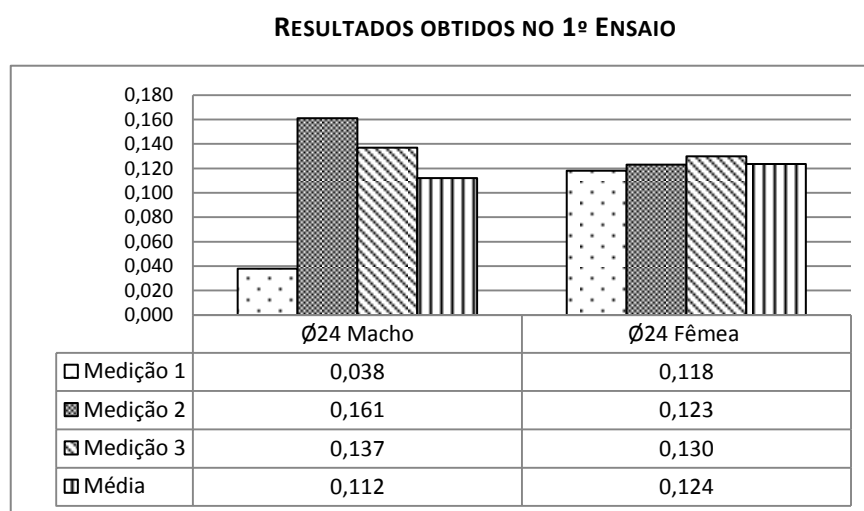


Gráfico 3.18 – Cilindridade do Macho e Fêmea Ø24 – 1ª Fase - 1º Ensaio

Os valores registados foram considerados aceitáveis comparando com os pretendidos.

Em seguida apresenta-se o segundo ensaio.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

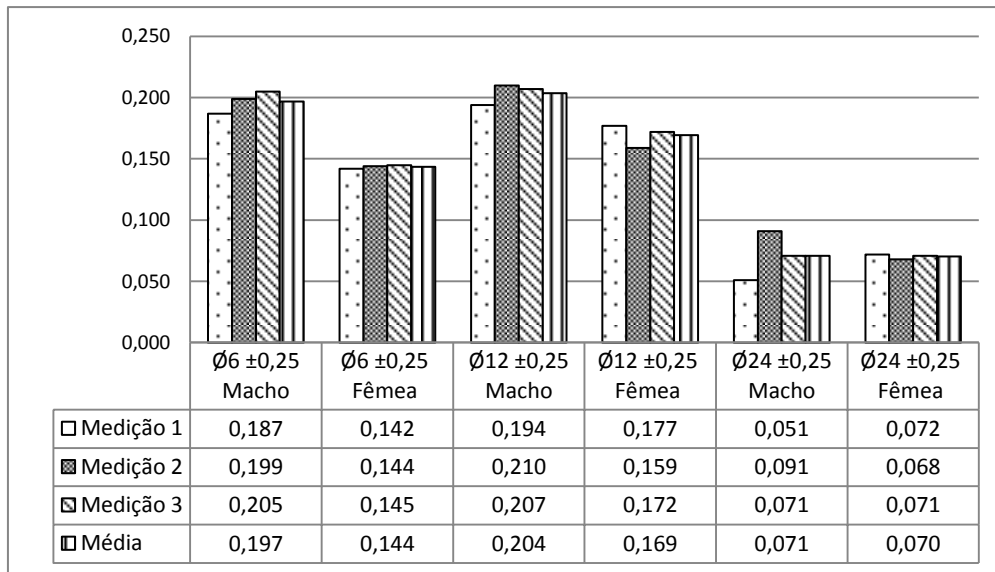


Gráfico 3.19 – Cilindricidade do Macho e Fêmea com ±0.25 – 1ª Fase - 2º Ensaio

Os valores obtidos estão dentro da tolerância pretendida.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

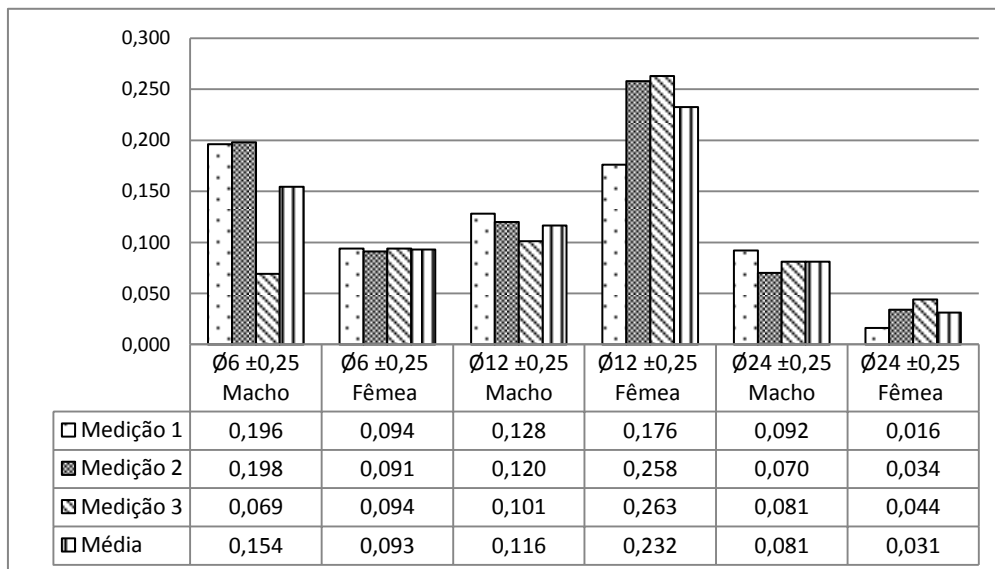


Gráfico 3.20 – Cilindricidade do Macho e Fêmea com ±0.25 – 1ª Fase - 3º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO

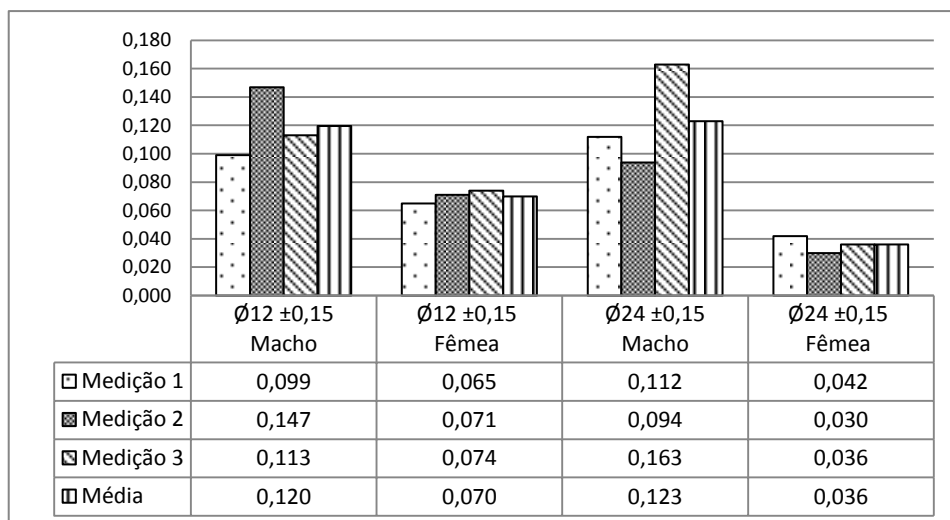


Gráfico 3.21 – Cilindricidade do Macho e Fêmea com $\pm 0,15$ – 1ª Fase - 4º Ensaio

Nestes quatro gráficos da análise da cilindridade, como se pode observar, o valor da cilindridade varia entre 0,031 e 0,232 mm. O que permite classificar estes resultados dentro da qualidade ISO 2768-2 mK.

3.7.1.5 Análise da planeza

Para analisar a planeza dos modelos usou-se apenas a superfície plana no topo dos cilindros. De acordo com a ISO 2768-2 cL para que uma superfície seja razoavelmente plana o valor para Ø6 mm deve ser inferior a 0,1 mm e para Ø12 e Ø24 mm deve ser inferior a 0,2 mm. Nos ensaios seguintes apresentam-se os valores obtidos e as conclusões.

RESULTADOS OBTIDOS NO 1º ENSAIO

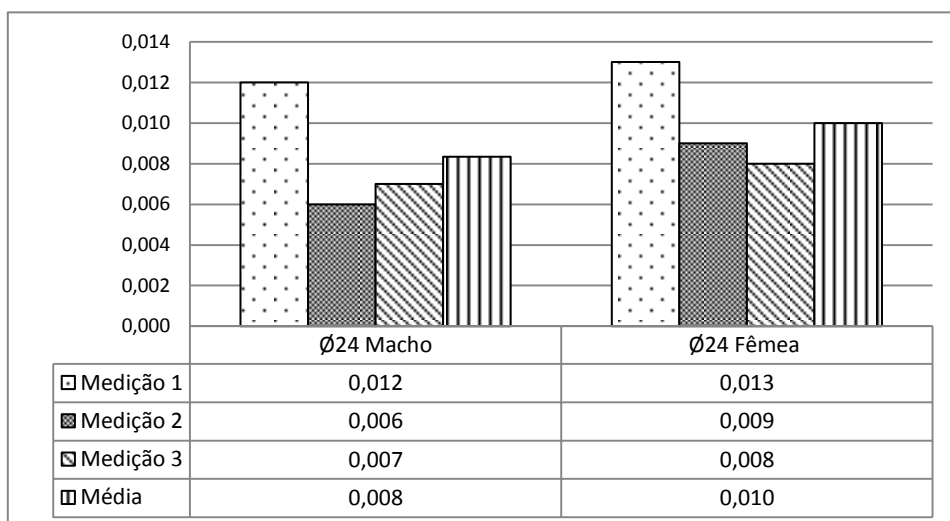


Gráfico 3.22 – Planeza do Macho e Fêmea Ø24 – 1ª Fase - 1º Ensaio

Valor de planeza obtido não excede o valor recomendado.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

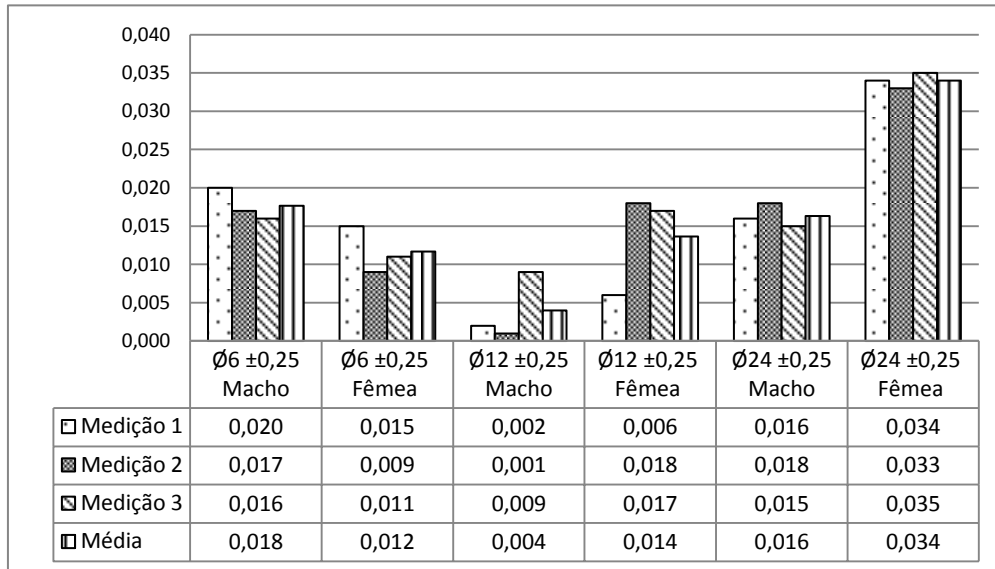


Gráfico 3.24 – Planeza do Macho e Fêmea com ± 0.25 – 1ª Fase - 2º Ensaio

Mais uma vez neste ensaio os valores não excedem o valor pretendido.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

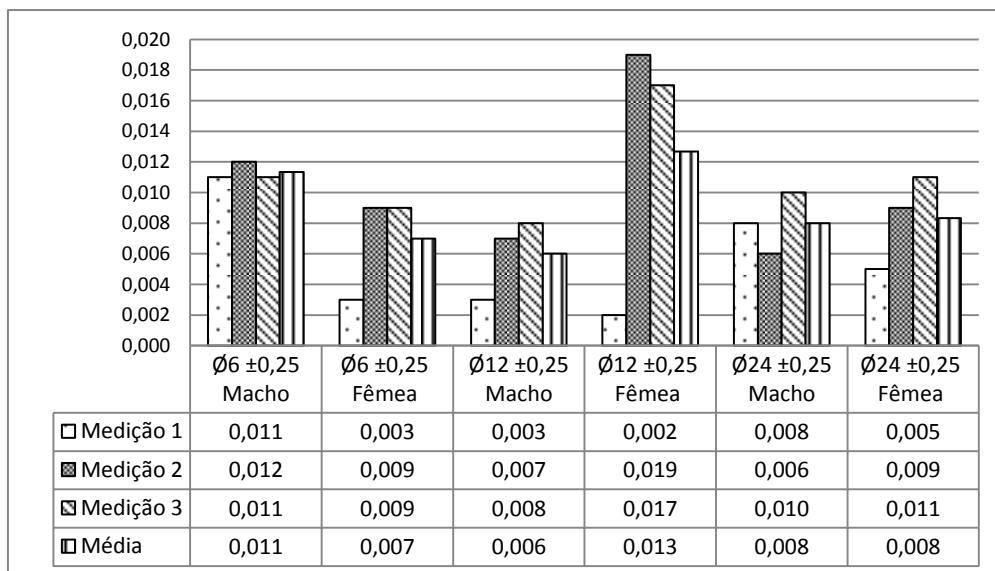


Gráfico 3.25 – Planeza do Macho e Fêmea com ± 0.25 – 1ª Fase - 3º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO

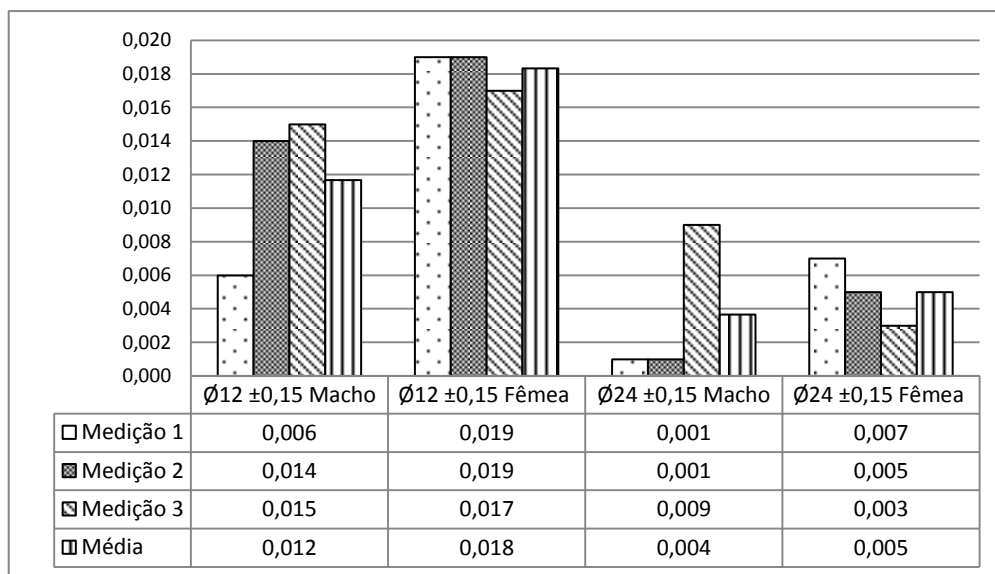


Gráfico 3.26 – Planeza do Macho e Fêmea com $\pm 0,15$ – 1ª Fase - 4º Ensaio

Os valores médios obtidos variam entre 0,004 e 0,034 mm e estão dentro das especificações de toleranciamento geral para a planeza de acordo com a norma ISO 2768-2 mK o que permite obter uma qualidade superior face à especificada para a ISO 2768-2 cL. Para a ISO 2768-2 mK os valores máximos são de 0,05 mm para Ø6 mm e de 0,1 mm para Ø12 e Ø24 mm. Em nenhum dos casos são ultrapassados os valores referidos pela ISO 2768-2 mK o que garante uma “qualidade” média da planeza dos modelos impressos por esta tecnologia.

3.7.2 Comparação das técnicas de revestimento – Zp 130

Nas análises que se seguem são apresentados os valores obtidos antes e depois do revestimento. Primeiro serão apresentados os resultados obtidos para os provetes sem revestimento e depois os resultados dos provetes com revestimentos com uma, duas e quatro passagens de mão dos diferentes acabamentos realizados. Entes provetes foram impressos juntamente com os modelos do terceiro ensaio.

Apenas serão apresentados os valores de 5 provetes e não a totalidade de provetes impressos, pois, a degradação ocorrida com os revestimentos de cola transparente e cola branca impossibilitam a realização de medições após a aplicação.

Os valores nominais de cada degrau são os seguintes:

- Degrau 5 - 5 mm
- Degrau 4 - 4 mm
- Degrau 3 - 3 mm
- Degrau 2 - 2 mm
- Degrau 1 - 1 mm

Para cada provete (régua) foi atribuído um revestimento, e depois fez-se a comparação direta entre o provete sem e com revestimento, a atribuição foi a seguinte:

- Régua 1 - Tinta Acrílica - Pincelado
- Régua 2 - Tinta Acrílica - Mergulhado
- Régua 3 - Verniz de Madeira - Pincelado
- Régua 4 - Verniz de Madeira - Mergulhado
- Régua 5 – Tinta - Spray

3.7.2.1 Análise da espessura da camada

Os valores apresentados no gráfico seguinte serviram de base de comparação para as próximas análises.

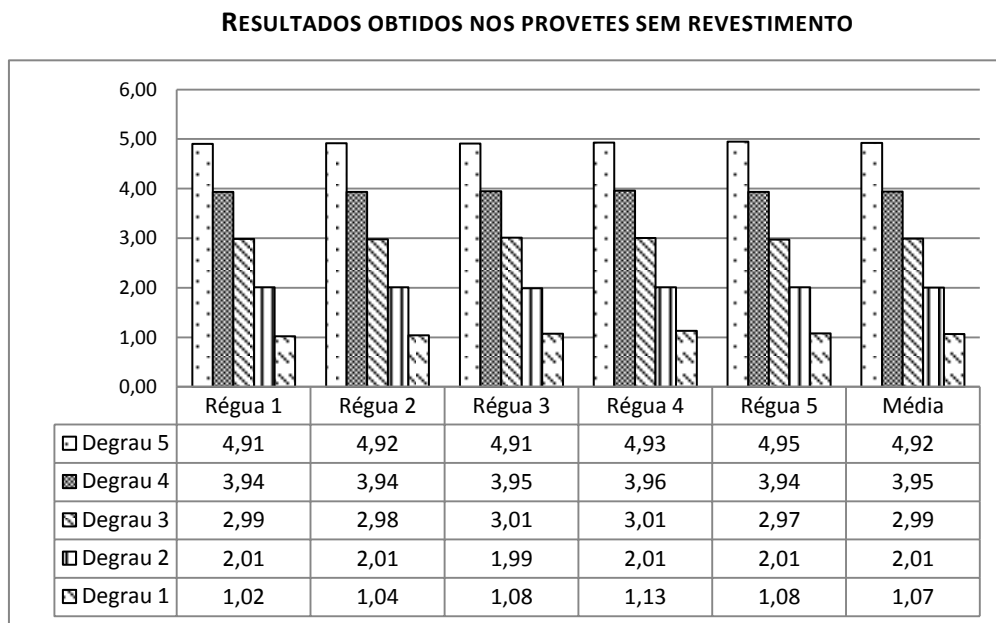


Gráfico 3.27 – Provetes sem revestimento

No próximo gráfico serão apresentados os valores para a primeira passagem de mão.

RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES – UMA CAMADA

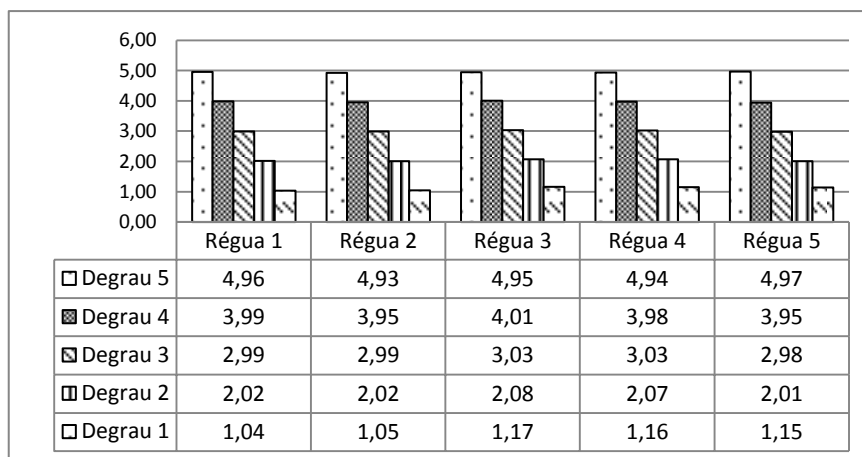


Gráfico 3.28 – 1ª Passagem de mão

Come se pode observar pelos valores obtidos as dimensões em todos os provetes aumentaram ligeiramente.

RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES – DUAS CAMADAS

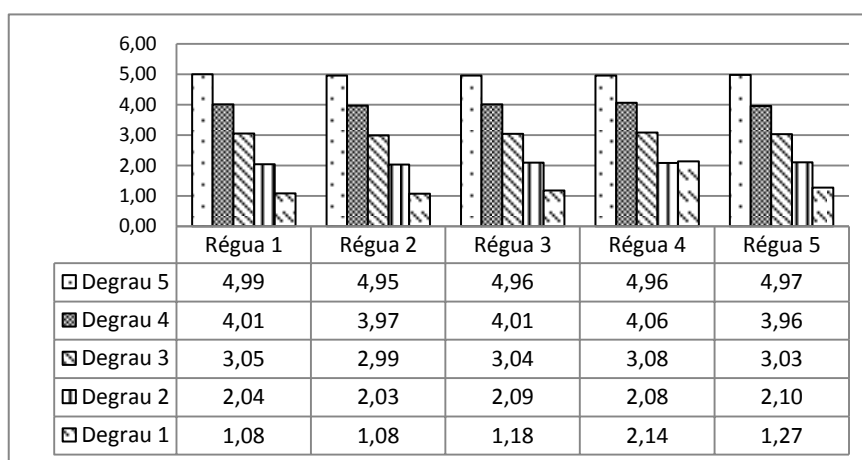


Gráfico 3.29 – 2ª Passagem de mão

Como é esperado as dimensões de cada provete voltaram a aumentar.

No próximo gráfico apresentam-se os valores da quarta passagem de mão.

RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES – QUATRO CAMADAS

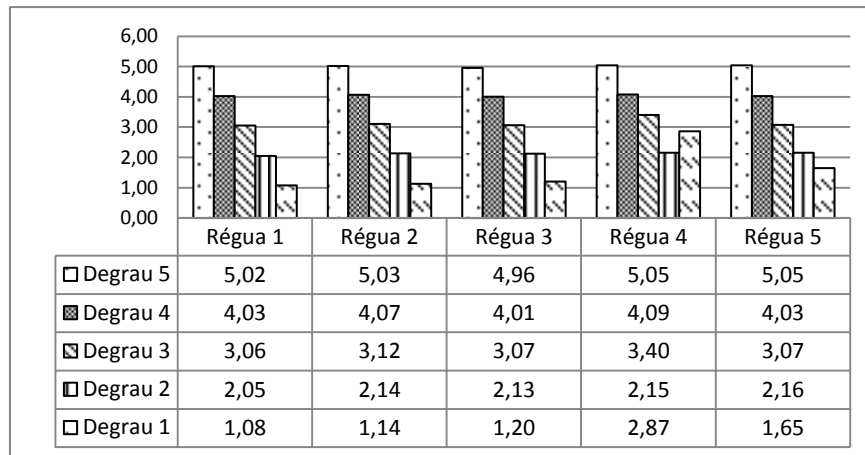


Gráfico 3.30 – 4ª Passagem de mão

Nos quatro gráficos anteriores pode-se observar as alterações das várias réguas conforme o número de passagens de revestimento aplicadas.

Nas análises seguintes serão apresentadas as evoluções de cada régua (provete) caso a caso, desde o ensaio sem revestimento até ao ensaio com quatro passagens de mão.

a) Análise da evolução da Régua 1 - Tinta Acrílica – Pincelado



Figura 3.23 – Provete de Tinta Acrílica Pincelado

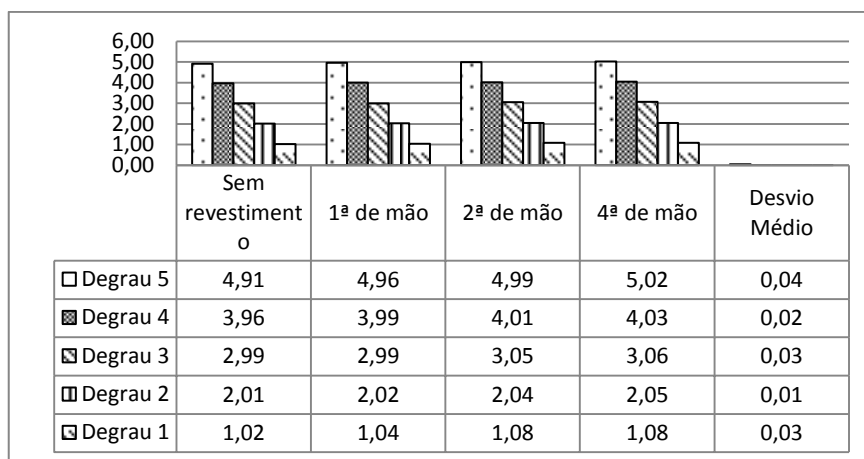


Gráfico 3.31 – Evolução Régua 1 - Tinta Acrílica – Pincelado

Observando estes valores apercebe-se de uma alteração mínima nos valores obtidos ao longo das aplicações de tinta, algo na ordem das centésimas (0,03 mm). O que não cria grande alteração às dimensões finais do objeto mesmo com quatro passagens de tinta pincelada.

b) Análise da evolução da Régua 2 - Tinta Acrílica – imersão



Figura 3.24 – Provete de Tinta Acrílica Mergulhado

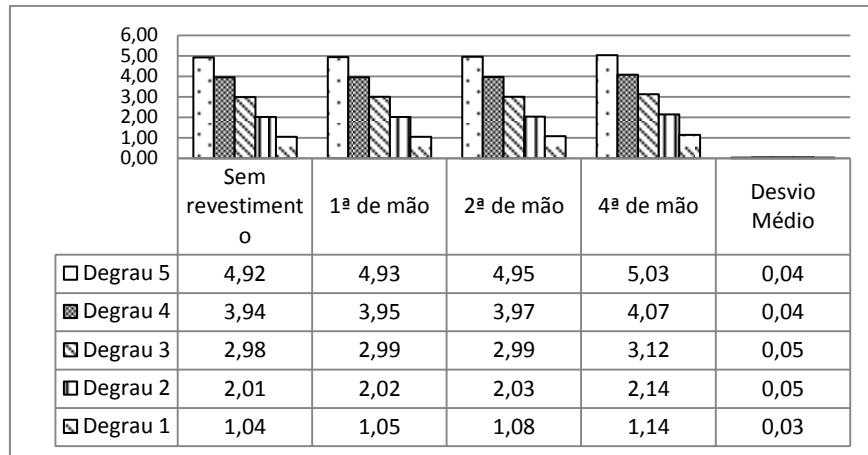


Gráfico 3.32 – Evolução Régua 2 - Tinta Acrílica – Mergulhado

Comparativamente com os resultados obtidos por pincelagem, os valores da aplicação da tinta por imersão alteram um pouco mais as dimensões do provete (0,04 mm), mas continua a ser uma alteração bastante baixa.

c) Análise da evolução da Régua 3 - Tinta acrílica – Pulverização

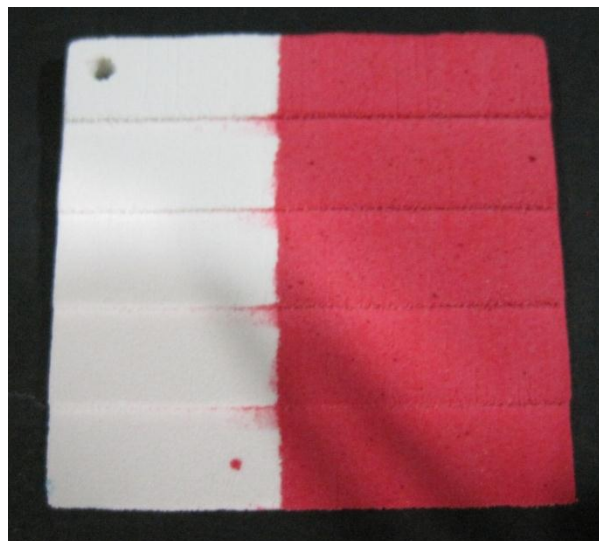


Figura 3.25 – Provete de Tinta em Spray

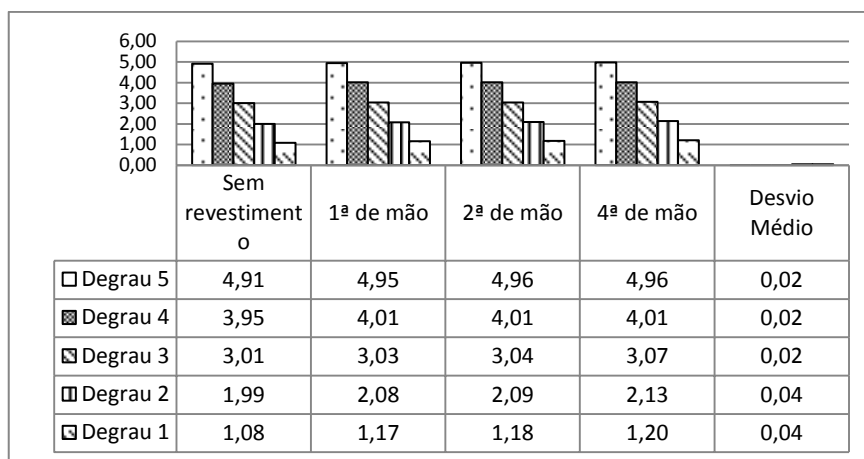


Gráfico 3.33 – Evolução Régua 3 - Tinta – Spray

Os valores obtidos por aplicação de spray foram os mais baixos apesar de um pequeno empeno no degrau um e dois, mas é sem dúvida o revestimento que altera menos as dimensões do modelo em camadas mais espessas.

d) Análise da evolução da Régua 4 – Verniz Madeira – Pincelado

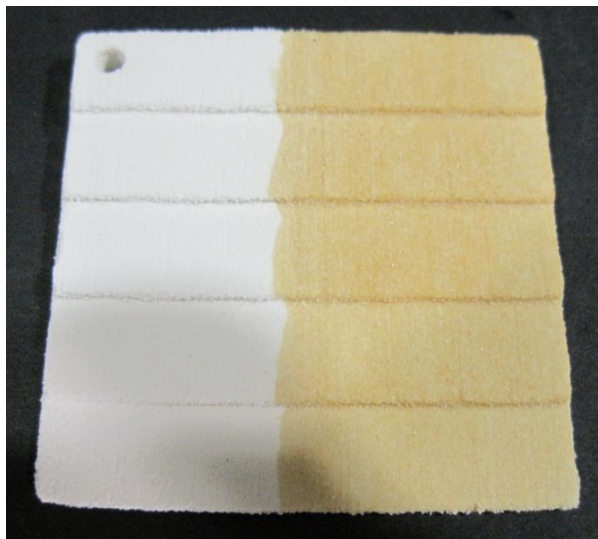


Figura 3.26 – Provete de Verniz de Madeira Pincelado

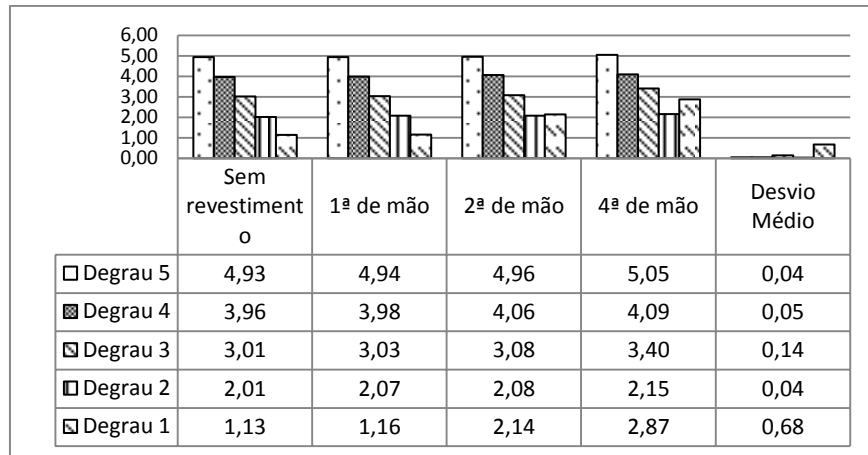


Gráfico 3.34 – Evolução Régua 4 – Verniz Madeira – Pincelado

Pode se verificar uma alteração significativa após a segunda de mão neste caso, criando um elevado empeno no provete.

Por último é apresentado o gráfico da evolução do provete com a aplicação de verniz de madeira mergulhado.

e) Análise da evolução da Régua 5 – Verniz Madeira – imersão



Figura 3.27 – Provete de Verniz de Madeira Mergulhado

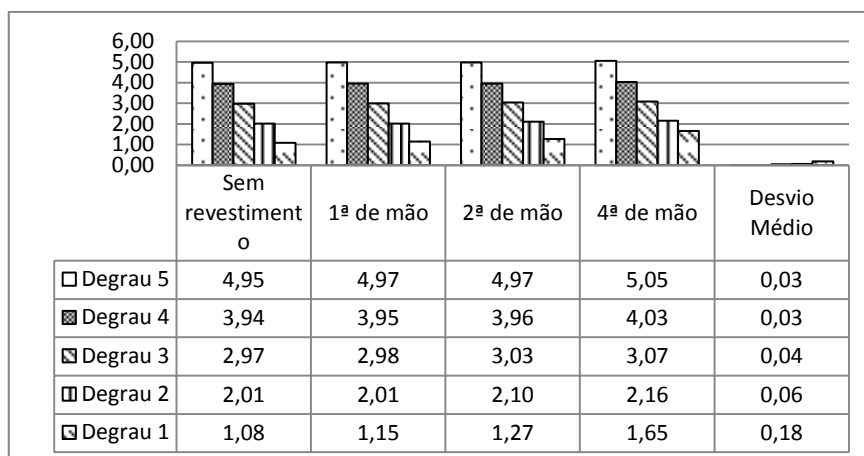


Gráfico 3.35 – Evolução Régua 5 – Verniz Madeira – Mergulhado

Após a análise pode-se verificar um grande empeno do provete na 2ª e 4ª passagem de mão nas camadas mais finas do provete, deixando este inutilizável como modelo funcional. A parte não pintada do provete acabou por partir, no degrau mais fino, devido à contração do material.

3.7.3 Resultados obtidos na 2ª fase – pó Zp 150

Na segunda fase analisaram-se também diversos provetes para testar os vários revestimentos selecionados para este estudo e também vários modelos de junção cilíndrica simples com as medidas nominais importadas diretamente do programa CAD no primeiro ensaio e depois com algumas alterações nos ensaios seguintes.

1º Ensaio - Análise ao Ø24 mm

2º Ensaio - Análise ao Ø24 e Ø24 ±0.15 mm

3º Ensaio - Análise ao Ø24 com ±0.05 ±0.10 ±0.15 mm

4º Ensaio - Análise ao Ø24 ±0.15 mm

Nesta segunda fase também foram impressas junções guiadas e roscadas, mas devido à dificuldade em apresentar resultados, esses conhecimentos serão empírico novamente. Mas não se desprezando também a sua utilidade, pois ao se estudar o modelo cilíndrico simples pode-se obter um valor padrão para aplicar nos outros modelos e validar-se uma folga genérica para este equipamento a funcionar com este tipo de pó.

3.7.3.1 Análise de folgas dos modelos – Diâmetros

Para esta segunda fase com o novo pó, na análise de folgas neste pretende-se novamente garantir uma folga de 0,5 mm, para que estes modelos possam ser considerados funcionais.

No primeiro ensaio analisou-se um modelo de junção cilíndrica simples com as dimensões nominais importadas diretamente do programa CAD.

Realizaram-se então a medição da junção cilíndrica com o valor nominal de Ø24 mm sem qualquer tipo de revestimentos, com os seguintes resultados.

a) Análise de desvios face ao valor nominal

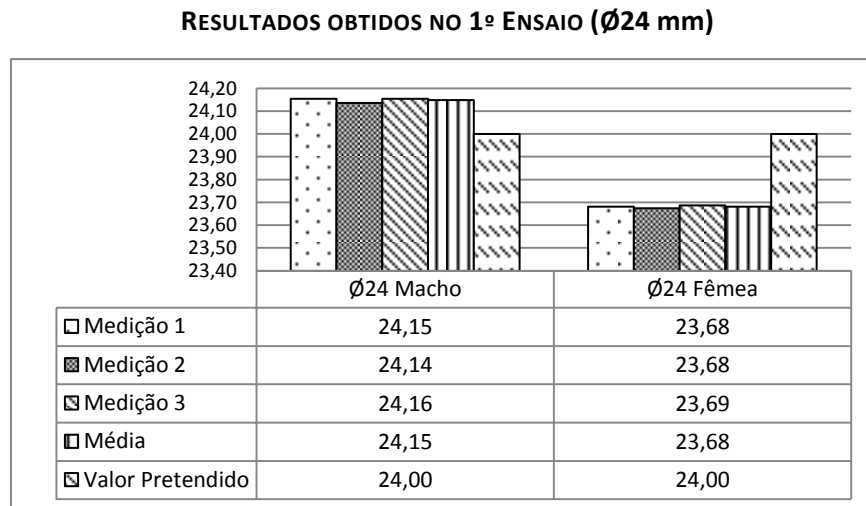


Gráfico 3.36 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø24 – 2ª Fase - 1º Ensaio

Neste primeiro ensaio para o pó Zp 150 verificou-se uma interferência de 0,47 mm o que impossibilita a montagem dos dois componentes. Para este material os resultados obtidos, neste ensaio, são totalmente contrários aos obtidos no primeiro ensaio da primeira fase (com o pó Zp 130) onde se obteve uma grande folga (0,93 mm), neste caso obteve-se interferência.

b) Análise de desvios para uma folga projetada de 0,3 mm

Para o segundo ensaio repetiu-se a impressão do modelo Ø24 mm com as medidas nominais e também se realizaram-se alterações num outro modelo CAD, onde se aumentou 0,15 mm ao diâmetro da fêmea e diminuiu 0,15 mm ao diâmetro do macho.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO (Ø24 mm)

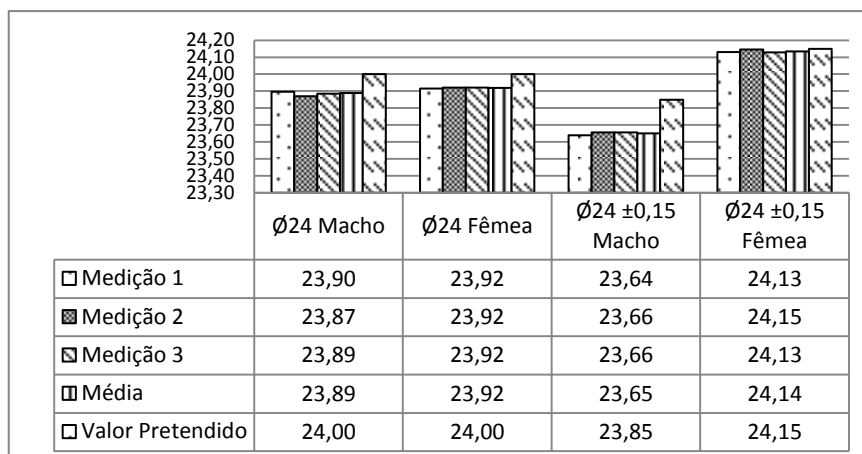


Gráfico 3.37 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø24 e Ø24 ±0.15 – 2ª Fase - 2º Ensaio

Nesta segunda repetição da junção cilíndrica de Ø24 mm verificou-se outra folga bastante diferente, mas igualmente pouco funcional, com um valor se folga de apenas 0,03 mm. A discrepância de valores entre o primeiro e segundo ensaio é acentuada, mas para efeitos de estudo vamos admitir este segundo ensaio como o modelo padrão para avançar com o estudo.

Também neste ensaio e com as alterações no modelo CAD verificou-se uma folga de 0,49 mm o que é um valor bastante bom.

c) Análise de desvios para folgas projetadas de 0,1 mm, 0,2 mm e 0,3 mm

No terceiro ensaio fizeram-se de novo alterações ao modelo CAD onde se desenharam modelos de Ø24 mm mas com alterações de ±0.05, ±0.10 e ±0.15 mm

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO (Ø24 mm)

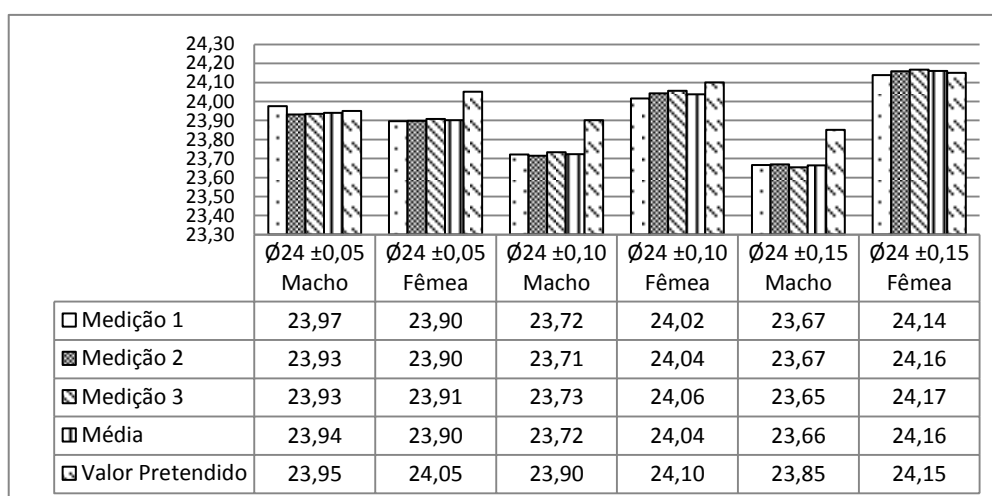


Gráfico 3.38 – Diâmetro do Macho e Fêmea Ø24 ±0.05, ±0.10 e ±0.15 – 2ª Fase - 3º Ensaio

Para o ensaio com ± 0.05 mm resultou numa interferência de 0,04 mm, o que continua a ser um valor não funcional.

Para ± 0.10 e ± 0.15 as folgas obtidas foram respetivamente 0,32 mm e 0,50 mm. Em ambos os casos a folga obtida já tem valores mais apropriados e no caso de ± 0.15 obteve-se a folga exata de 0,5 mm. Mas empiricamente verificou-se que após algum uso os modelos desgastam-se, e conseqüentemente a folga aumenta significativamente, o que vai criar folgas acima dos valores apresentados.

No quarto ensaio foi testado de novo o modelo $\varnothing 24 \pm 0.15$ mm, mas com a diferença de que desta vez não se iria realizar o polimento inicial e a montagem da junção, apenas se retirou o excesso de pó possível retirar com o jato de ar.

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO

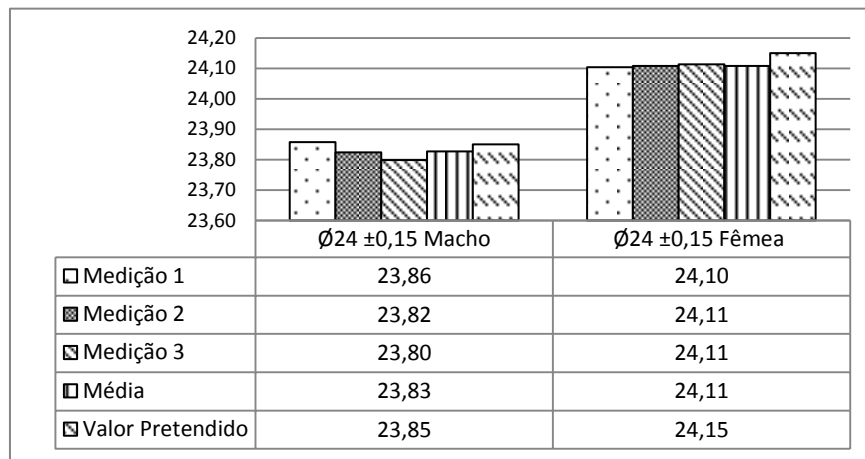


Gráfico 3.39 – Diâmetro do Macho e Fêmea $\varnothing 24 \pm 0.15$ – 2ª Fase - 4º Ensaio

Neste ensaio sem o polimento inicial obteve-se uma folga de 0,28 mm. Podemos concluir que um polimento retira uma camada de aproximadamente 0,11 mm a cada metade da junção do macho com a fêmea.

3.7.3.2 Análise de desvios dos modelos – Alturas

O valor da altura final dos modelos impressos foi analisado, obtendo os seguintes valores.

RESULTADOS OBTIDOS NO 1º ENSAIO

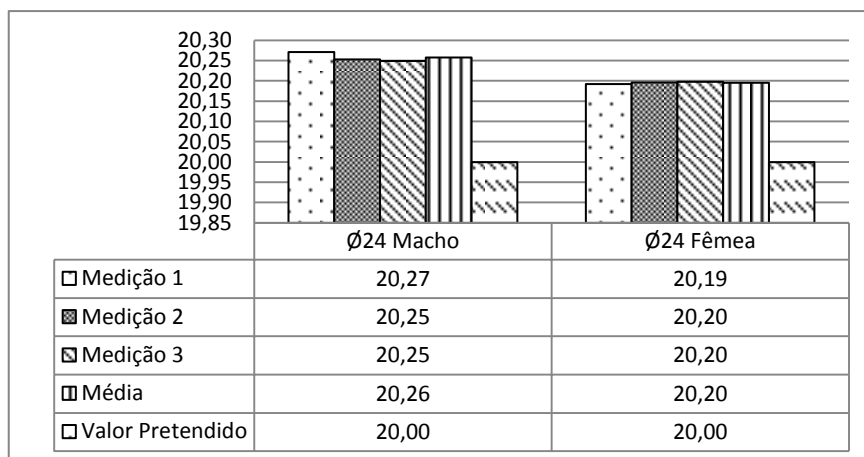


Gráfico 3.40 – Altura do Macho e Fêmea Ø24 – 2ª Fase - 1º Ensaio

Nos ensaios realizados obteve-se um valor de altura para ambos os componentes em média de mais 0,23 mm em relação ao valor da cota nominal de 20 mm.

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

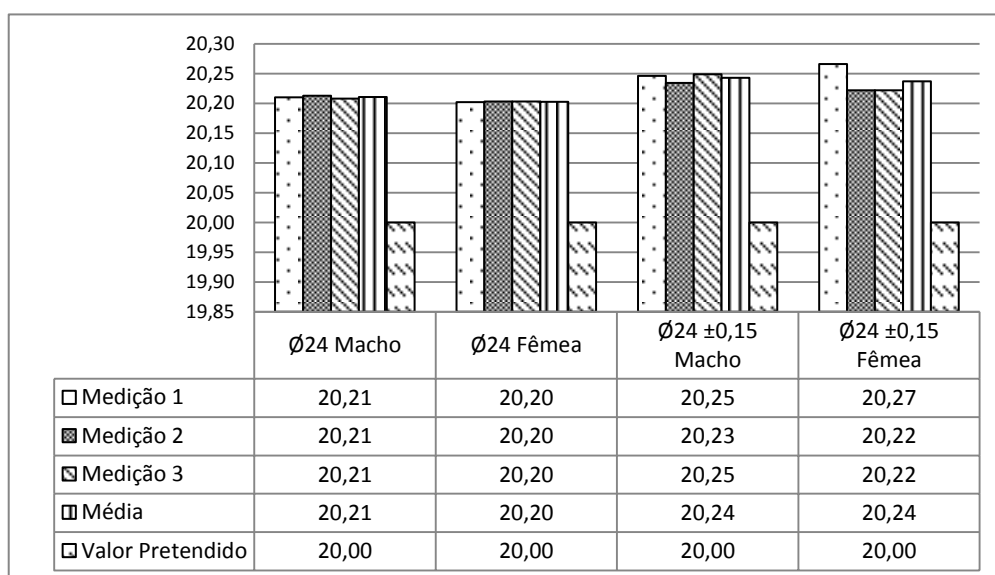


Gráfico 3.41 – Altura do Macho e Fêmea Ø24 e Ø24 ±0.15 – 2ª Fase - 2º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

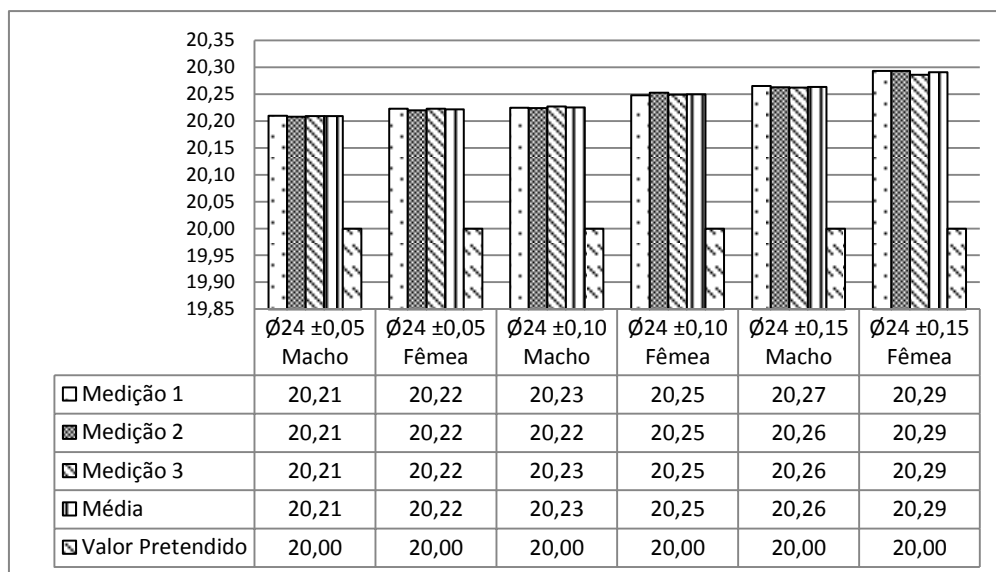


Gráfico 4.33 – Altura do Macho e Fêmea Ø24 ±0,05, ±0,10 e ±0,15 – 2ª Fase - 3º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO

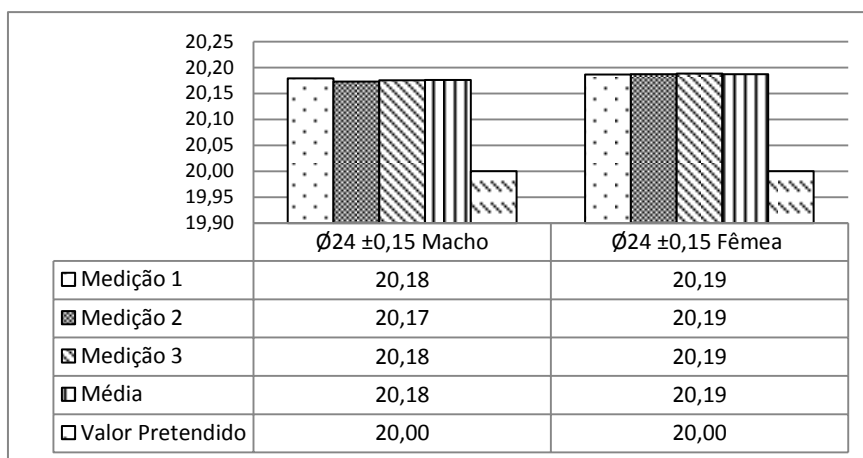


Gráfico 3.42 – Altura do Macho e Fêmea Ø24 ±0,15 – 2ª Fase - 4º Ensaio

Analisando os quatro gráficos anteriores, relativos à altura obtida nos modelos impressos, obtém-se uma gama de desvio que varia entre 0,19 e 0,24 mm.

3.7.3.3 Análise da circularidade

À semelhança da primeira fase (pó Zp 130) o valor da circularidade que garante uma qualidade aceitável (ISO 2768-2 mK) para o toleranciamento geral em objetos cilíndricos deve igual à tolerância dimensional, mas inferior à tolerância de batimento. Neste caso para Ø24 mm é também de 0,4 mm.

Nos gráficos seguintes analisam-se os valores obtidos nos modelos impressos e compara-se com o valor pretendido.

O primeiro ensaio consistiu na análise de circularidade macho-fêmea para Ø24 mm, os resultados são apresentados no gráfico que se seguem.

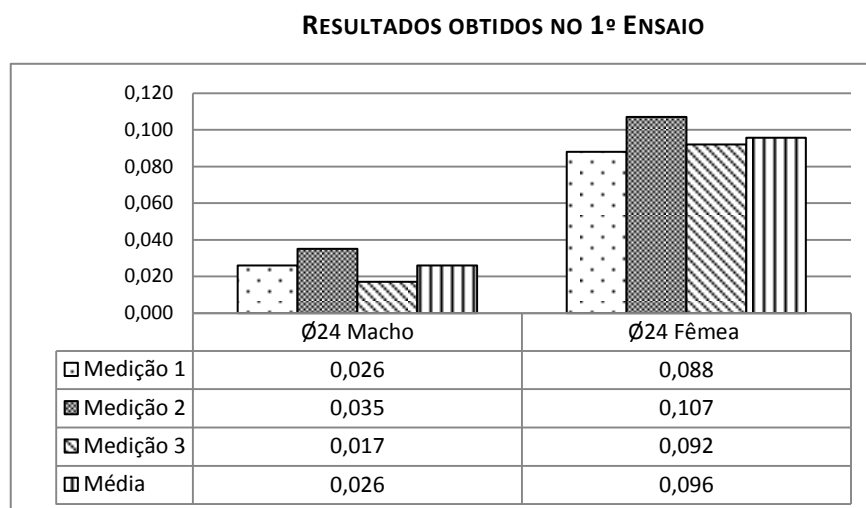


Gráfico 3.43 – Circularidade do Macho e Fêmea Ø24 – 2ª Fase – 1º Ensaio

Os valores obtidos situam-se dentro dos valores permitidos, portanto pode-se considerar bastante circular.

No segundo ensaio analisa-se os modelos com Ø24 mm e Ø24 ±0,15 mm.

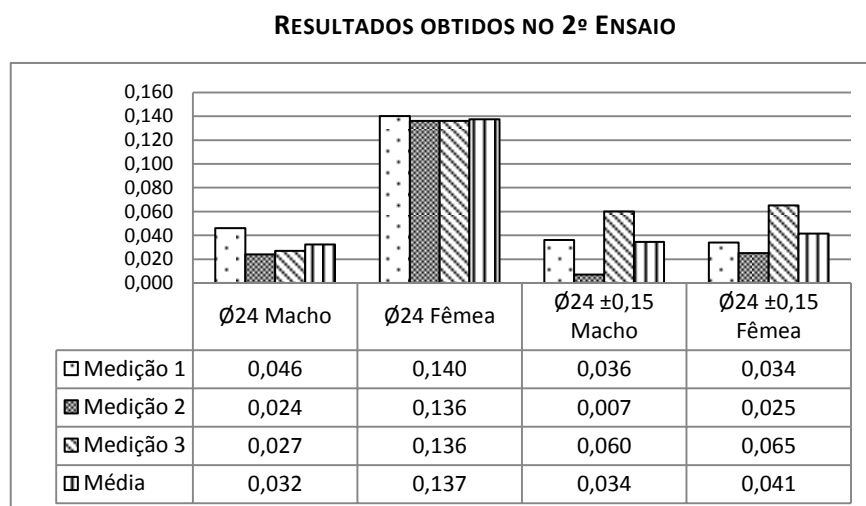


Gráfico 3.44 – Circularidade do Macho e Fêmea Ø24 e Ø24 ±0.15 – 2ª Fase – 2º Ensaio

No terceiro ensaio estudou-se a circularidade dos modelos com $\varnothing 24 \pm 0.05$, ± 0.10 e ± 0.15 mm.

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

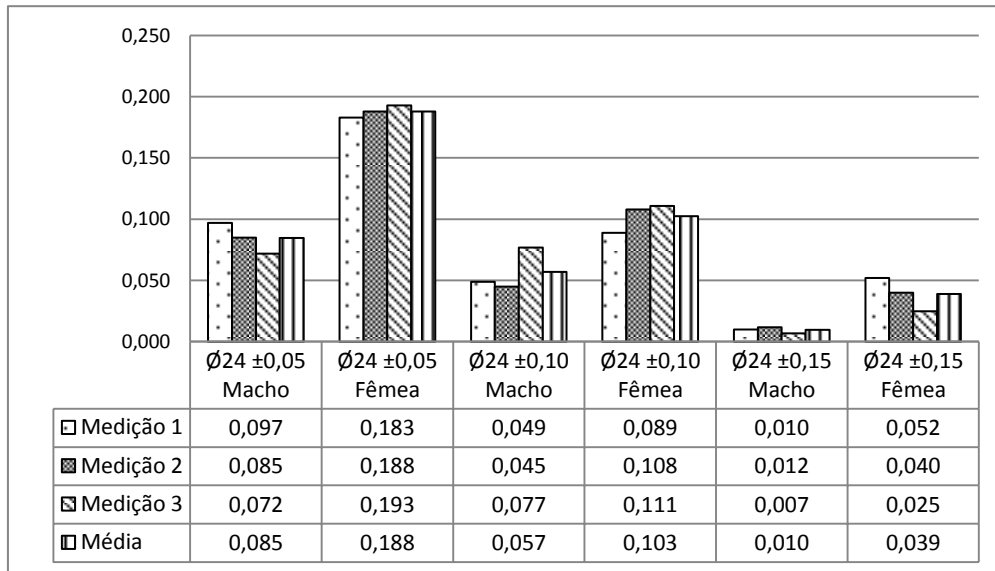


Gráfico 3.45 – Circularidade do Macho e Fêmea $\varnothing 24 \pm 0.05$, ± 0.10 e ± 0.15 – 2ª Fase - 3º Ensaio

Com valores obtidos dentro dos esperados.

No quarto ensaio volta-se a estudar o caso $\varnothing 24 \pm 0.15$ mm.

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO

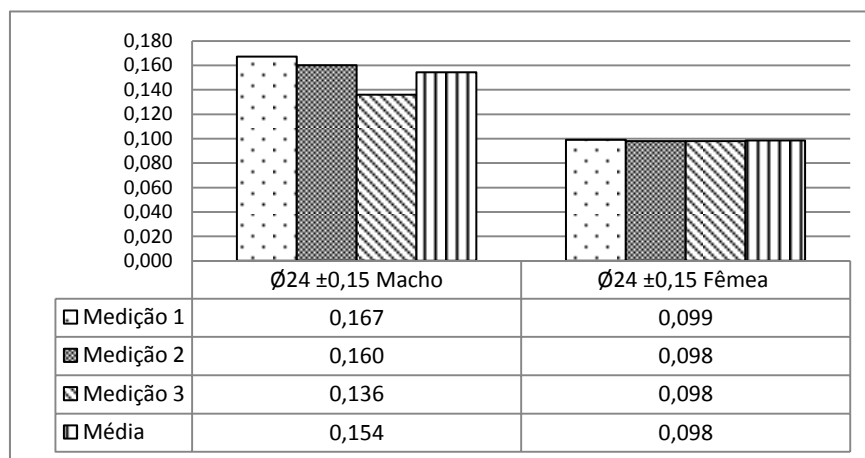


Gráfico 3.46 – Circularidade do Macho e Fêmea $\varnothing 24 \pm 0.15$ – 2ª Fase - 4º Ensaio

Como se pode observar nos quatros gráficos acima apresentados (gráfico 3.43 ao 3.46) as médias de circularidades obtidas variam entre 0,010 e 0,188 mm à semelhança dos resultados obtidos na primeira fase (com o pó zp 130) o qual nunca ultrapassa o valor pretendido de 0,4 mm para o Ø24 mm.

3.7.3.4 Análise da cilindridade

À semelhança da primeira fase, para esta segunda fase não são prescritas tolerâncias gerais para a cilindridade, estas resultam da combinação da tolerância de circularidade com a tolerância de rectitude.

Como na análise da cilindridade para o pó Zp 130, para o pó Zp 150 o valor a obter deve-se manter abaixo dos 0,4 mm ISO 2768-2 mK.

Apresenta-se abaixo os gráficos referentes a esses resultados.

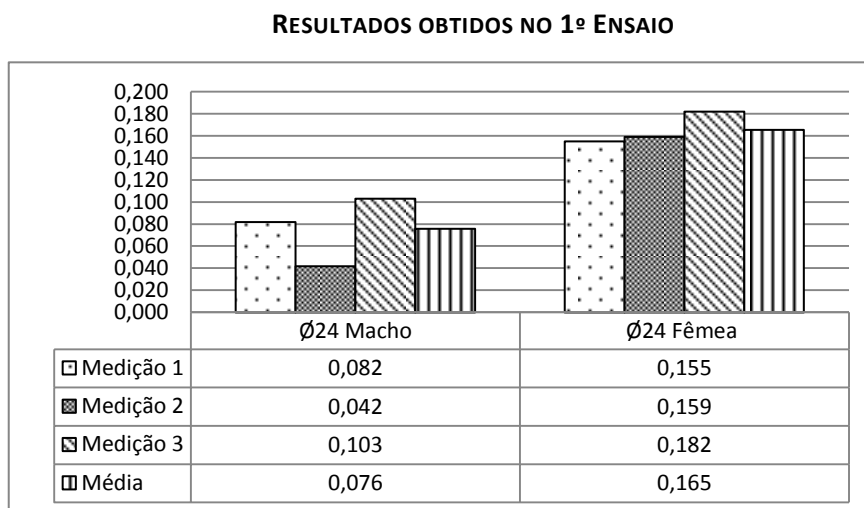


Gráfico 4.47 – Cilindridade do Macho e Fêmea Ø24 – 2ª Fase - 1º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

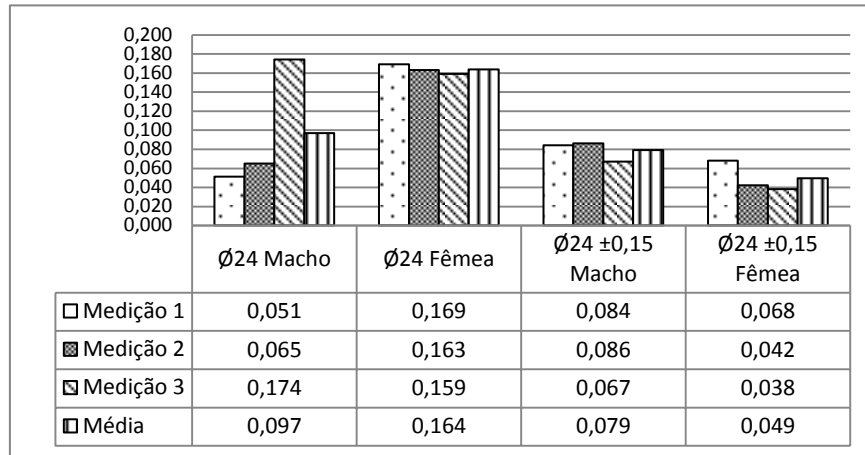


Gráfico 3.48 – Cilindricidade do Macho e Fêmea Ø24 e Ø24 ±0.15 – 2ª Fase – 2º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

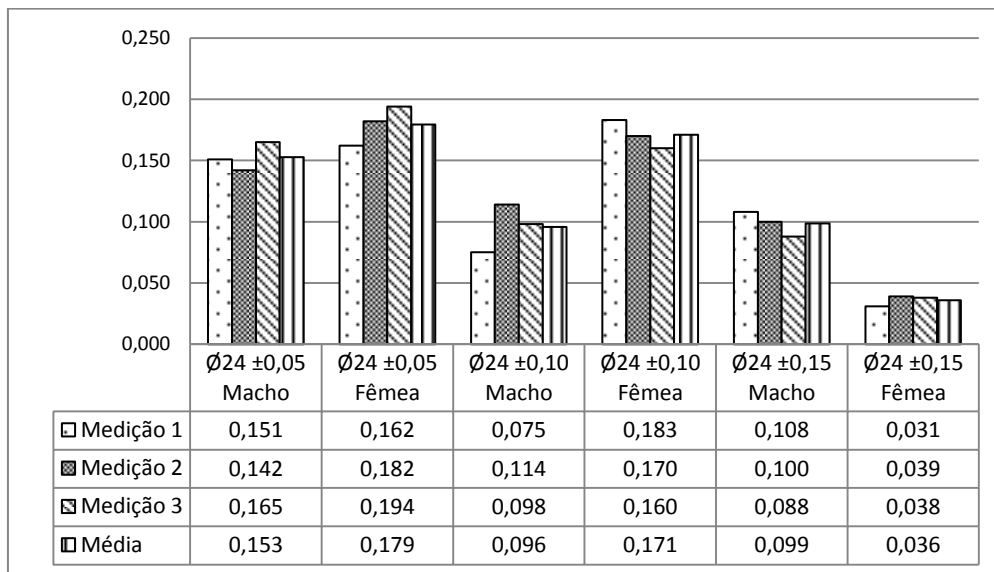
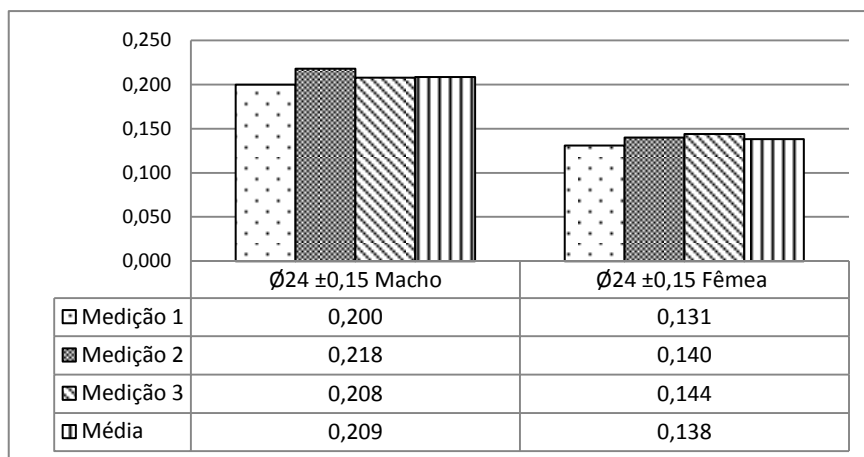


Gráfico 3.49 – Cilindricidade do Macho e Fêmea Ø24 ±0.05, ±0.10 e ±0.15 – 2ª Fase - 3º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO**Gráfico 4.42 – Cilindricidade do Macho e Fêmea Ø24 ±0.15 – 2ª Fase - 4º Ensaio**

Nestes gráficos da análise da cilindridade, como se pode observar, os valores médios da cilindridade variam entre 0,036 e 0,209 mm. À semelhança do pó anterior (Zp 130) os valores obtidos foram bastante satisfatórios, em nenhum dos casos o valor da cilindridade superou ao valor pretendido de 0,4 mm, ISO 2768-2 mK, o que demonstra que a impressora tem boa resolução em termos de impressão de cilindros independentemente do material usado.

3.7.3.5 Análise da planeza

Para analisar a planeza dos modelos usou-se apenas a superfície plana no topo dos cilindros. De acordo com a ISO 2768-2 cL para que uma superfície seja razoavelmente plana o valor para Ø24 mm deve ser inferior a 0,2 mm. Mas igualmente ao que se verificou na fase anterior os valores obtidos estão dentro das especificações de tolerânciamento geral para a planeza de acordo com a norma ISO 2768-2 mK o que permite obter uma qualidade superior face à especificada para a ISO 2768-2 cL. Para a ISO 2768-2 mK o valor máximo é de 0,1 mm para um Ø24 mm.

Nos gráficos seguintes apresentam-se os resultados obtidos e as conclusões.

RESULTADOS OBTIDOS NO 1º ENSAIO

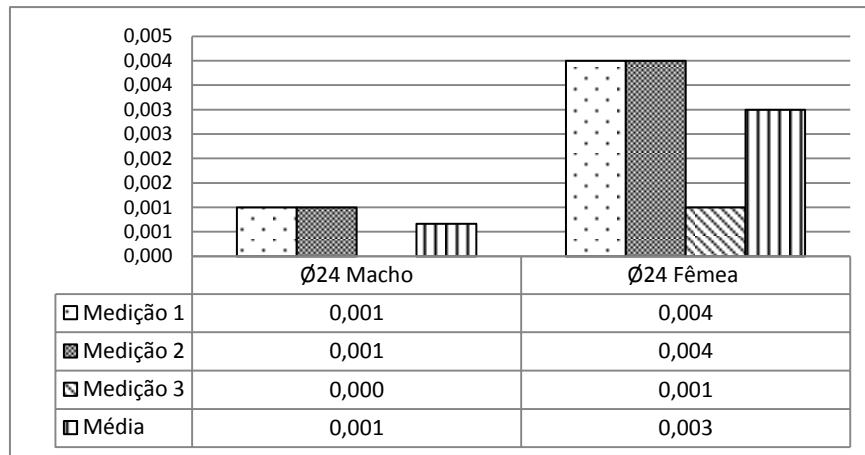


Gráfico 3.50 – Planeza do Macho e Fêmea Ø24 – 2ª Fase - 1º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 2º ENSAIO

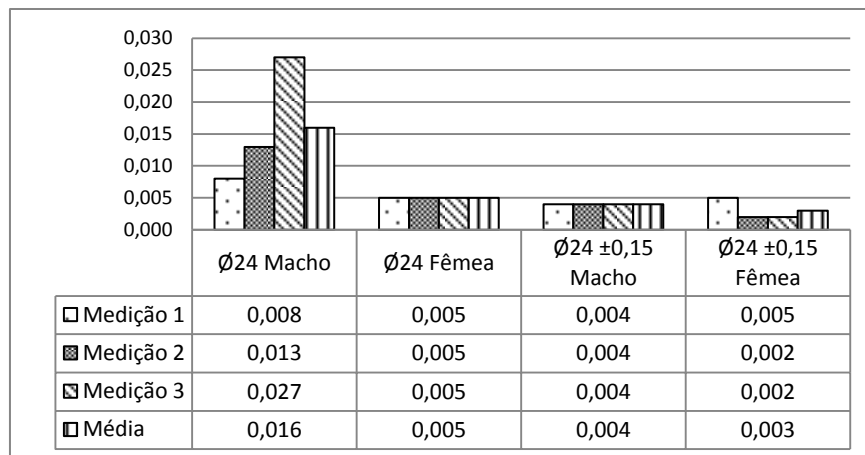


Gráfico 3.51 – Planeza do Macho e Fêmea Ø24 e Ø24 ±0.15 – 2ª Fase - 2º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 3º ENSAIO

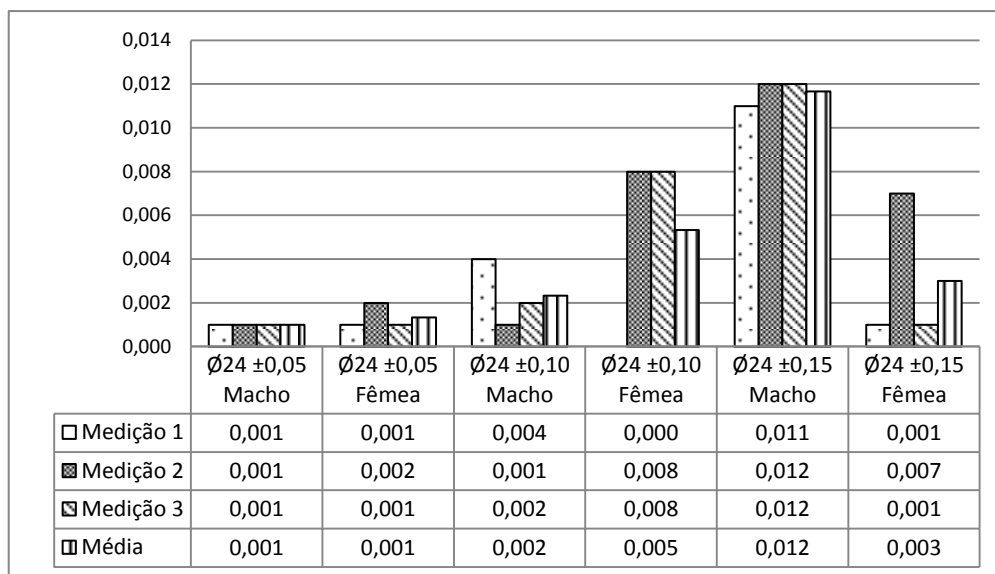


Gráfico 3.52 – Planeza do Macho e Fêmea Ø24 ±0.05, ±0.10 e ±0.15 – 2ª Fase - 3º Ensaio

RESULTADOS OBTIDOS NO 4º ENSAIO

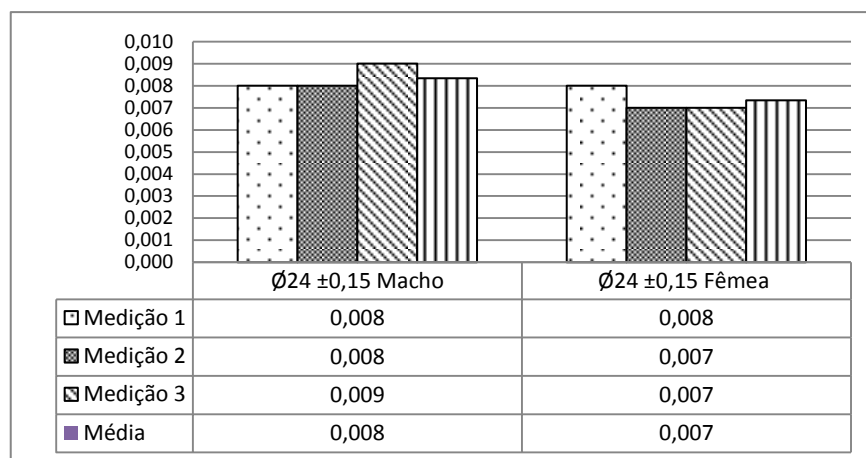


Gráfico 3.53 – Planeza do Macho e Fêmea Ø24 ±0.15 – 2ª Fase - 4º Ensaio

Os valores obtidos nos quatro gráficos anteriores são indicadores de uma grande precisão da impressora em termos de planeza visto que os valores obtidos variam entre 0,001 e 0,016 mm. Em nenhum dos casos são ultrapassados os valores referidos pela ISO 2768-2 mK.

3.7.4 Comparação das técnicas de revestimento - Zp 150

Nas análises que se seguem são apresentados os valores obtidos antes e depois do revestimento. Primeiro serão apresentados os resultados obtidos para os provetes sem revestimento e depois os resultados dos provetes com revestimentos com duas

passagens de mão dos diferentes acabamentos realizados. Apenas serão apresentados para esta segunda fase resultados para duas passagens de mão, pois, analisando os valores obtidos na primeira fase do estudo (com o pó Zp 130) os resultados de apenas duas passagens de mão apresentavam a melhor relação acabamento visual/dimensão final. Entes provetes foram impressos juntamente com os modelos do segundo ensaio. Serão então apresentados os valores de 8 provetes testados.

Os valores nominais de cada degrau são os seguintes:

Degrau 5 - 5 mm

Degrau 4 - 4 mm

Degrau 3 - 3 mm

Degrau 2 - 2 mm

Degrau 1 - 1 mm

Para cada provete (régua) foi atribuído um revestimento, e depois fez-se a comparação direta entre o provete sem e com revestimento, a atribuição foi a seguinte:

Régua 1 - Tinta Acrílica - Pincelado - No forno

Régua 2 - Tinta Acrílica - Pincelado

Régua 3 - Tinta - Spray

Régua 4 - Verniz de Madeira - Pincelado

Régua 5 - Cola Transparente (Goma Arábica) - Pincelado

Régua 6 - Verniz - Spray

Régua 7 - Água - Spray – No forno

Régua 8 - Água - Spray

3.7.4.1 Análise da espessura da camada

Estes foram os valores obtidos após impressão, sem qualquer tipo de revestimento.

RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES SEM REVESTIMENTO

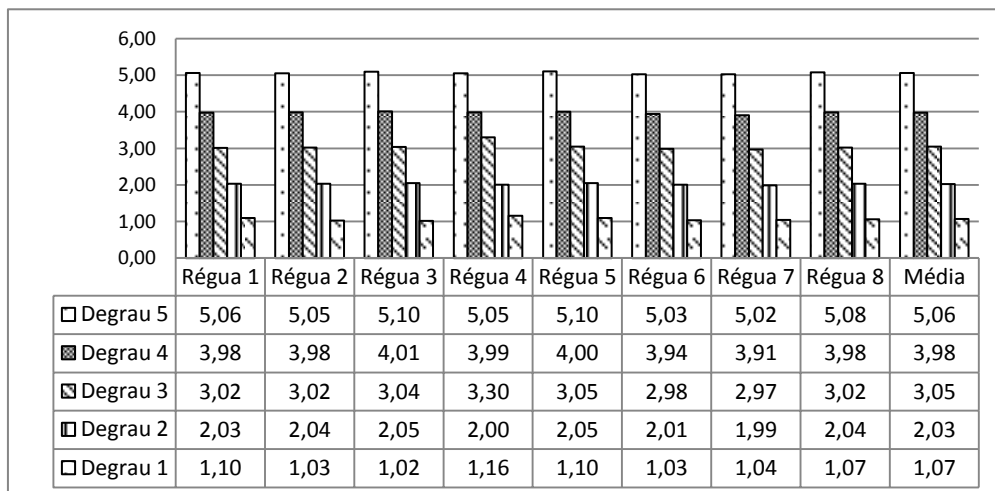


Gráfico 3.54 – Provetes sem revestimento

No gráfico seguinte são apresentados os valores da segunda passagem de mão dos revestimentos selecionados.

RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES – DUAS CAMADAS

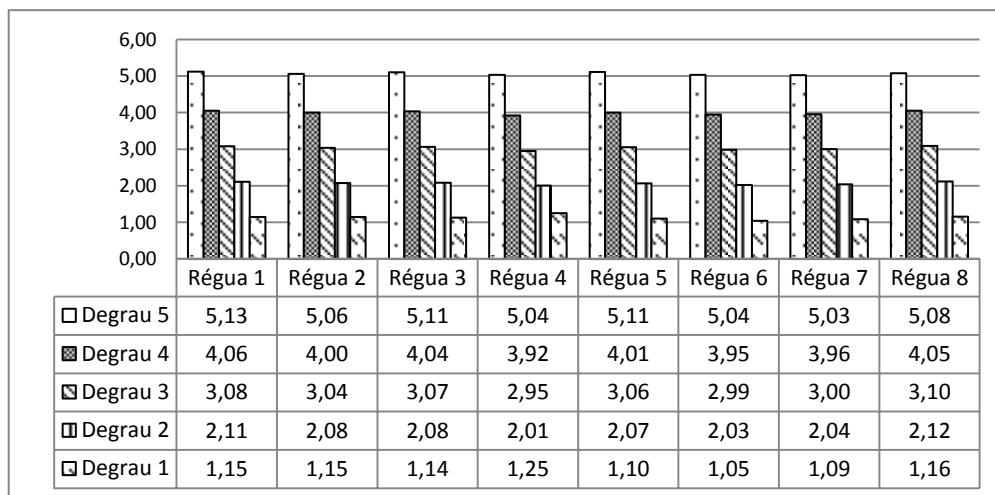


Gráfico 3.55 – 2ª Passagem de mão

Como se pode observar nos valores obtidos, após a aplicação de duas camadas de revestimento, apresentam um acréscimo á espessura inicialmente obtida por impressão.

Nos gráficos seguintes apresenta-se a evolução de cada provete, comparando os valores obtidos antes de depois do revestimento, caso a caso.

a) Análise da evolução da Régua 1 - Tinta Acrílica – Pincelado – No Forno

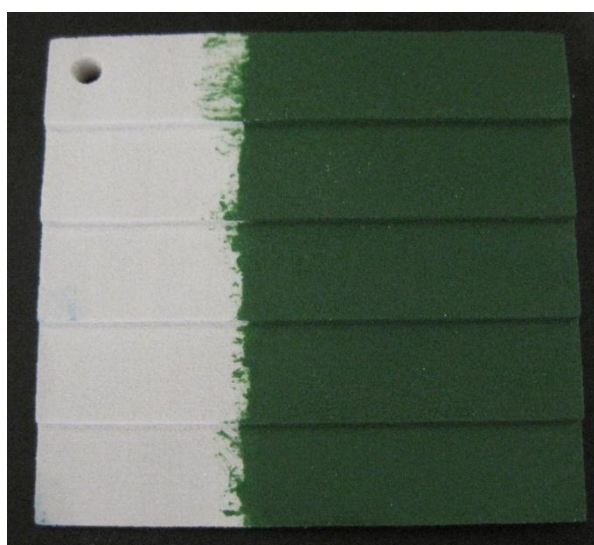


Figura 3.32 – Tinta Acrílica Pincelado

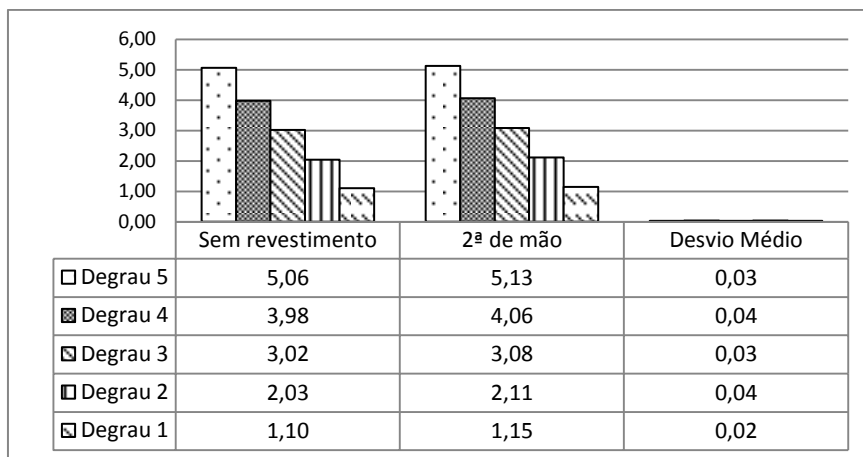


Gráfico 3.56 – Evolução Régua 1 - Tinta Acrílica – Pincelado – No Forno

Neste primeiro ensaio procedeu-se à secagem do provete no forno antes de se aplicar o revestimento para perceber se esse cozimento causaria alguma diferença na dimensão final do provete.

Observando estes valores apercebe-se de uma alteração muito baixa nos valores obtidos após a aplicação da tinta, algo na ordem das centésimas (0,03 mm), à semelhança dos valores obtidos nos provetes da primeira fase. O que não cria grande alteração às dimensões finais do objeto.

No ensaio seguinte analisa-se um outro provete sem o cozimento no forno, mas com o mesmo revestimento de tinta aplicada por pincel.

b) Análise da evolução da Régua 2 - Tinta Acrílica – Pincelado

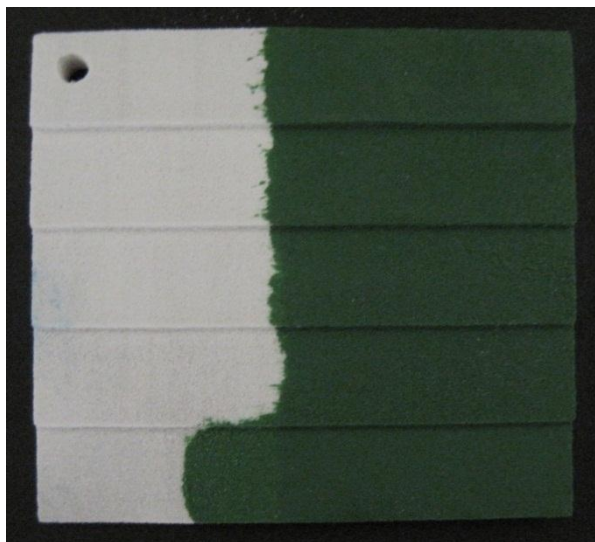


Figura 3.33 – Provete de Tinta Acrílica

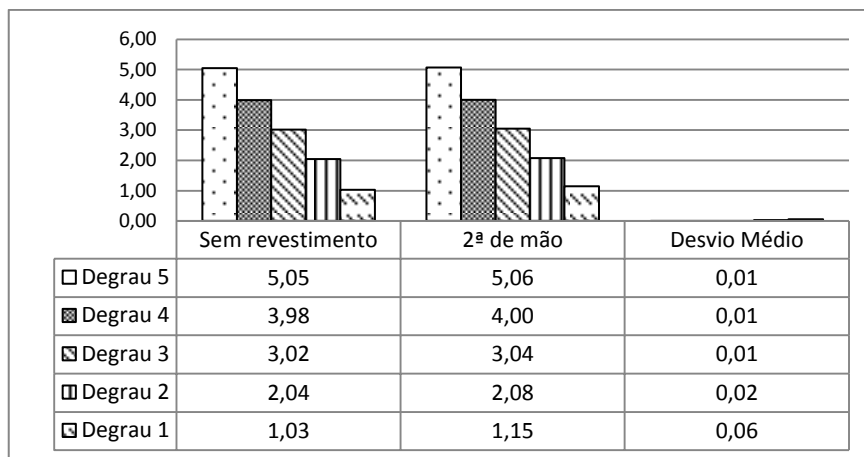


Gráfico 3.57 – Evolução Régua 1 - Tinta Acrílica – Pincelado

Neste ensaio a alteração foi na ordem dos 0,02 mm. Comparando o provete sem o cozimento e com o cozimento as diferenças são mínimas e em termos dimensões finais do provete, mas neste caso verificou-se que sem o cozimento a alteração dimensional foi menor.

No ensaio seguinte analisou-se o provete pintado por spray.

c) Análise da evolução da Régua 3 – Tinta – Pulverizado

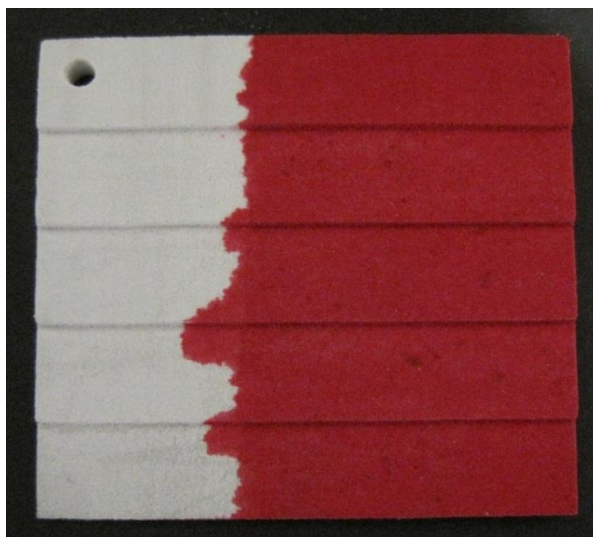


Figura 3.34 – Provete de Tinta em Spray

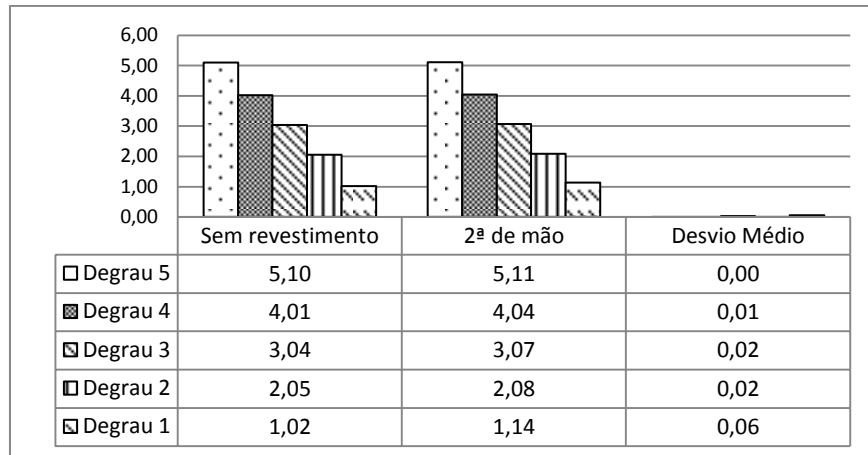


Gráfico 3.58 – Evolução Régua 3 - Tinta – Spray

Como no ensaio análogo neste provete verificam-se as alterações baixas no provete, tendo alterado a altura do provete em 0,02 mm em média.

No ensaio seguinte estão apresentados os valores do provete pincelado com verniz de madeira.

d) Análise da evolução da Régua 4 – Verniz Madeira – Pincelado

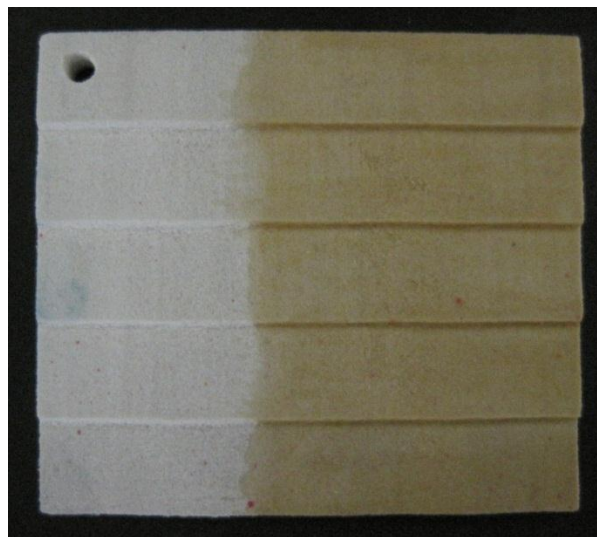


Figura 3.35 – Provete de Verniz de Madeira Pincelado

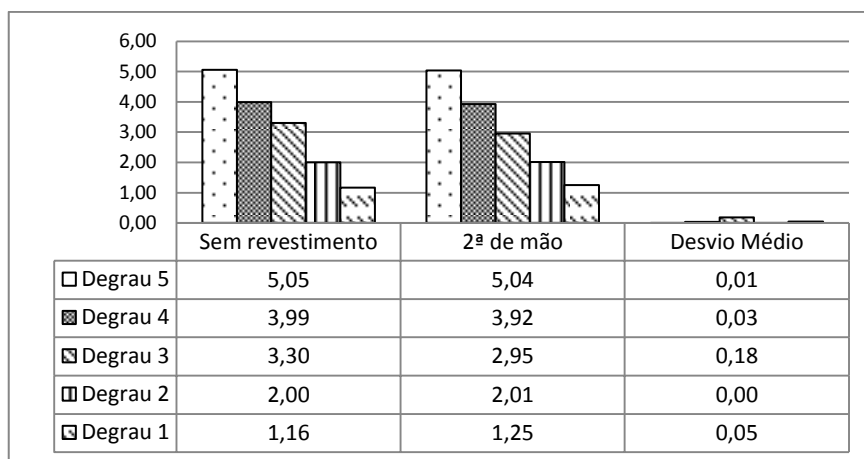


Gráfico 3.59 – Evolução Régua 4 – Verniz Madeira – Pincelado

Neste ensaio, contrariamente aos resultados obtidos com o material usado na primeira fase, não se verificou empeno do provete nos degraus mais finos, mantendo-se o modelo intacto e funcional. Continua a ser o revestimento que cria uma maior espessura no provete, com uma alteração na ordem dos 0,05 mm.

Neste segundo ensaio, devido a maior resistência do material já foi possível testar cola transparente como um revestimento alternativo, os valores obtidos são apresentados no gráfico seguinte.

e) Análise da evolução da Régua 5 – Cola Transparente (Goma Arábica)

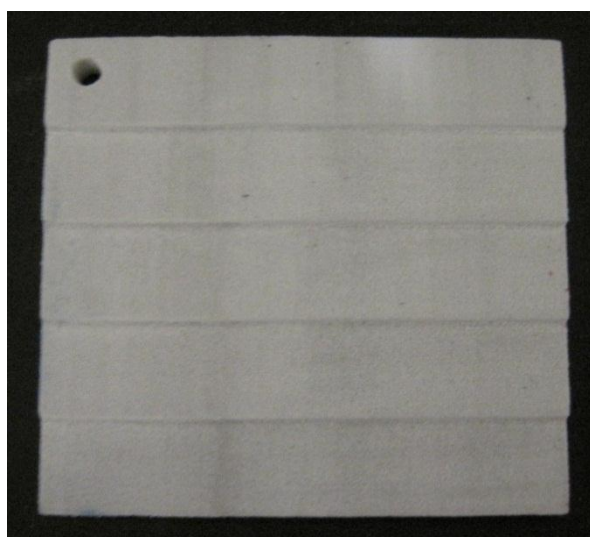


Figura 3.36 – Provete de Cola Transparente (Goma Arábica)

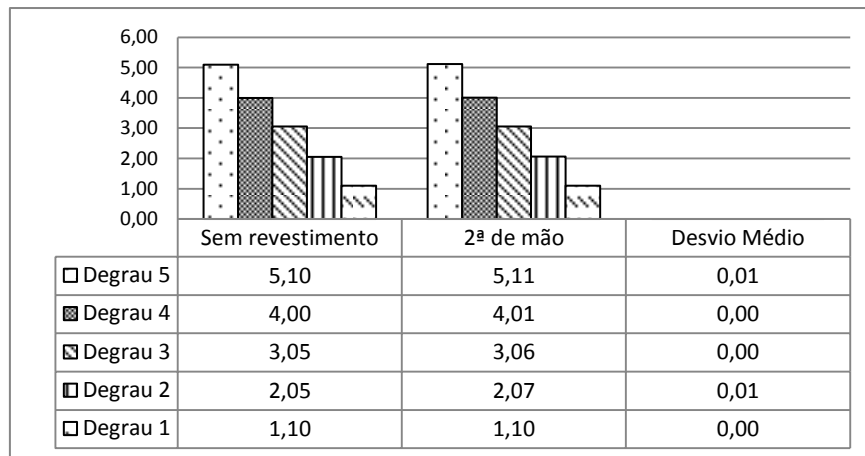


Gráfico 3.60 – Evolução Régua 5 – Cola Transparente (Goma Arábica) – Pincelado

Neste provete verificou-se uma das mais baixas alterações obtidas neste estudo, com alteração ao nível das milésimas de milímetro.

f) Análise da evolução da Régua 6 – Verniz – Pulverizado

Nesta segunda fase de estudo teve-se acesso a um outro possível revestimento, verniz em spray. Os valores obtidos são analisados no próximo gráfico.

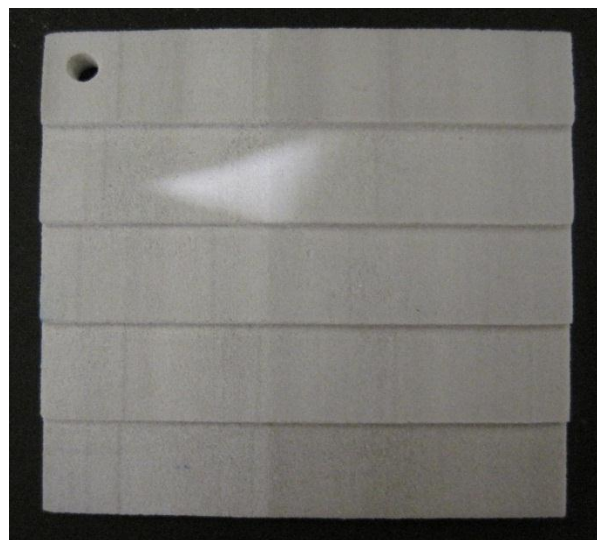


Figura 3.37 – Provete de Verniz em Spray

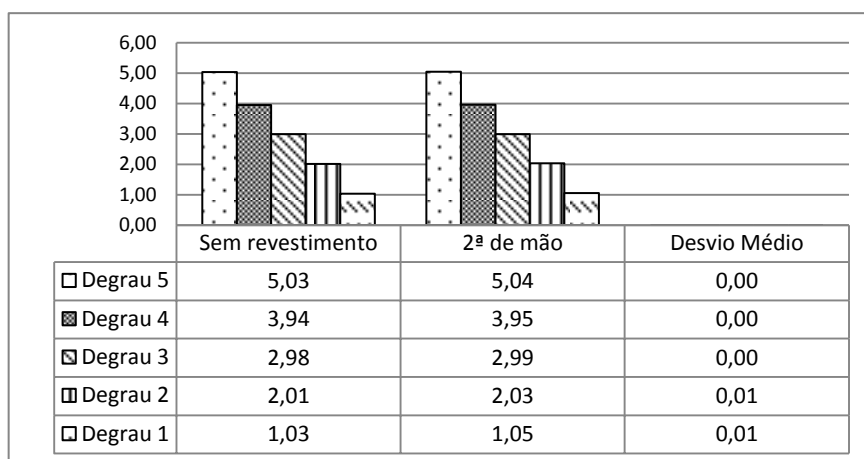


Gráfico 3.61 – Evolução Régua 6 – Verniz – Spray

Este ensaio obteve os mesmos valores, de alteração nas dimensões do modelo, que o ensaio onde se testou a cola transparente.

g) Análise da evolução da Régua 7 – Água – Forno

Por último testou-se a impregnação por spray de água, visto que uma das características deste novo pó (Zp 150) é a possibilidade de se poder usar água para melhorar as propriedades da peça.

Na régua número sete realizou-se o cozimento no forno e na oitava régua não, os valores obtidos para os dois casos é exposto e analisado nos gráficos seguintes.

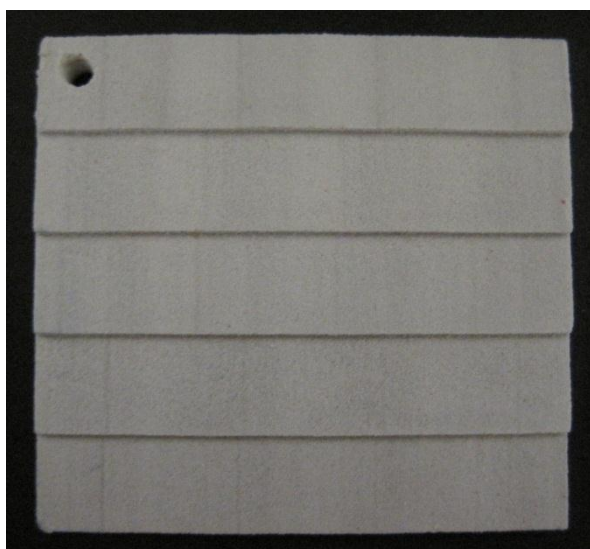


Figura 3.38 – Provete de Água Forno

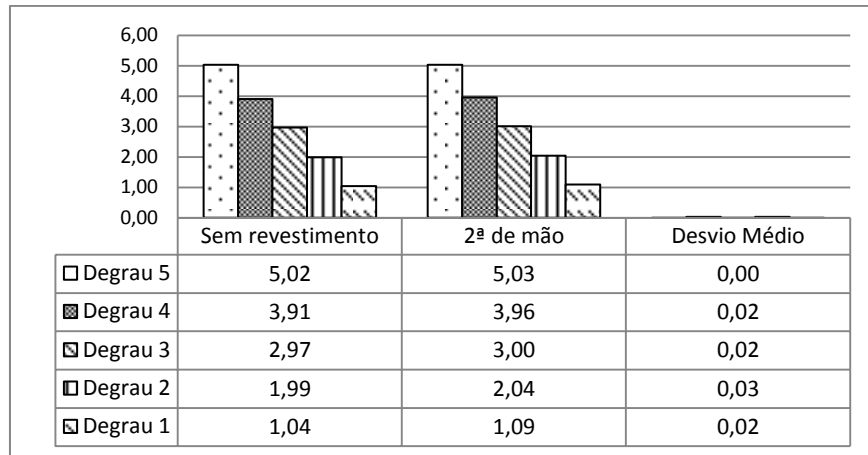


Gráfico 3.62 – Evolução Régua 7 – Água – Forno

Neste ensaio com o provete tratado por cozimento o valor de alteração do modelo foi de apenas 0,02 mm.

h) Análise da evolução da Régua 8 – Água

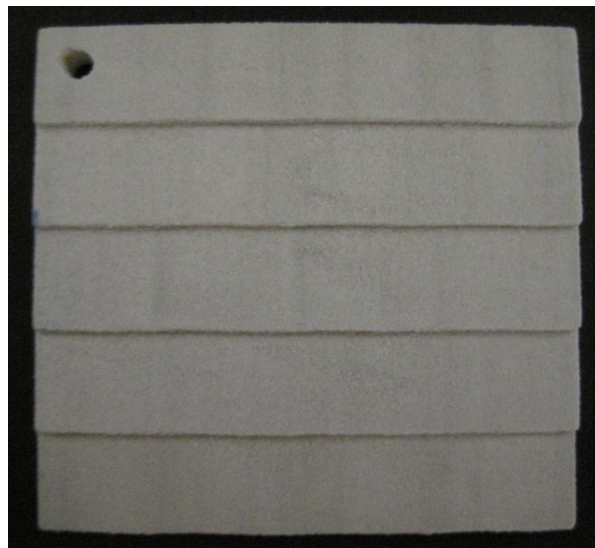


Figura 3.39 – Provete de Água Forno

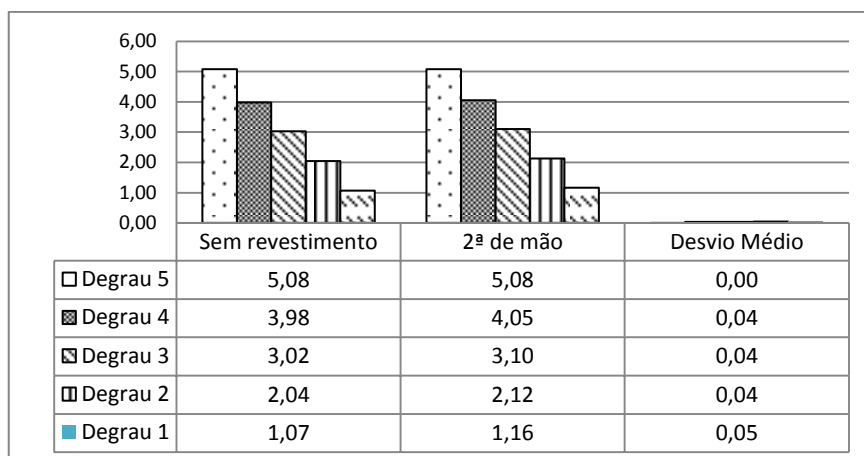


Gráfico 3.63 – Evolução Régua 8 – Água

Neste último ensaio verificou-se um pequeno aumento do valor de alteração obtido no modelo, algo na casa dos 0,03 mm.

Como no ensaio da tinta pincelada, o facto de o provete ser cozido ou não, não traz grande alteração para as dimensões finais do provete.

3.7.5 Modelos funcionais simples

Em seguida são mostrados os modelos físicos obtidos. Modelos das junções simples cilíndrica, guiada e roscada.

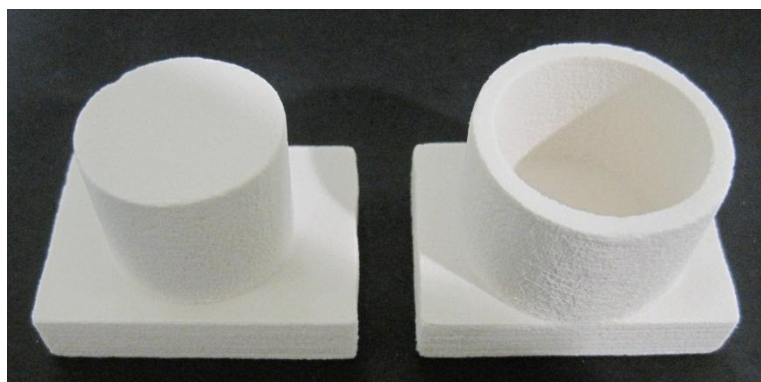


Figura 3.28 – Junção Cilíndrica Simples

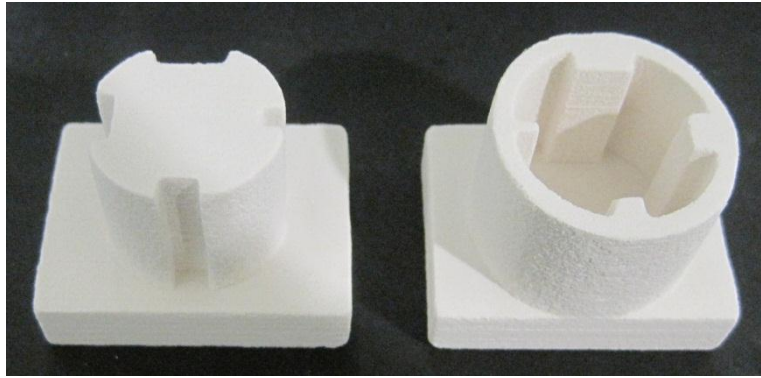


Figura 3.29 – Junção Cilíndrica Guiada

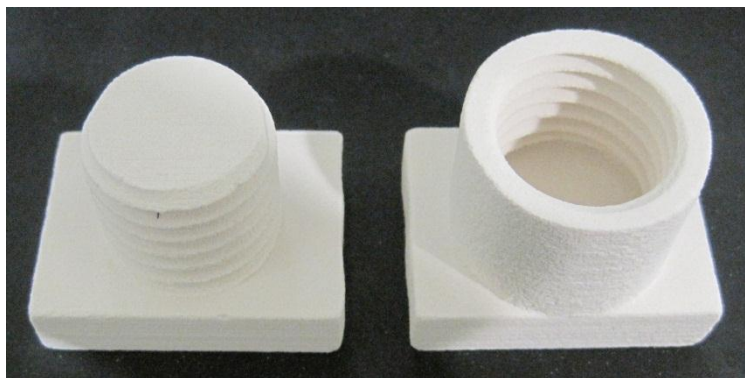


Figura 3.30 – Junção Cilíndrica roscada

Estes modelos foram obtidos após as alterações feitas no modelo CAD, e impressos com o pó Zp 130. Todos os modelos são funcionais.

3.7.6 Modelos técnico-funcionais

Com os valores obtidos com os resultados experimentais avançou-se para a impressão de um modelo funcional. Primeiramente fez-se a impressão de um modelo com as medidas nominais desenhadas no CATIA, o que confirmou que o modelo fabricado com as medidas nominais não era funcional. Na segunda impressão aplicaram-se as alterações ao nível de folgas e o mecanismo passou a ser funcional. Como em qualquer outro modelo impresso com este pó o desgaste e destruição do modelo é bastante visível. Com este modelo pretendeu-se apenas verificar os pressupostos obtidos nos resultados experimentais anteriores pelo que não foi efetuada nenhuma medição ou controlo dimensional, apenas se verificou a montabilidade e funcionalidade dos componentes.

Na figura a baixo mostra-se o mecanismo desenvolvido para o pó Zp 130 com as alterações no modelo CAD.

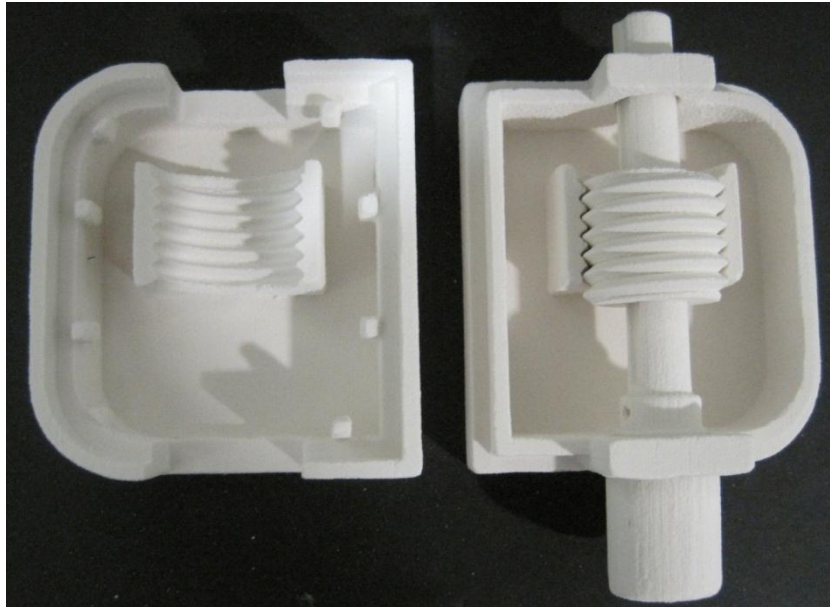


Figura 3.31 – Modelo Funcional Pó Zp 130

Este mecanismo encaixa na perfeição e o componente roscado desliza para cima e para baixo como é pretendido. Com a utilização o modelo sofre um desgaste acelerado e começa a perder precisão.

Na figura seguinte mostra-se o mecanismo desenvolvido para o pó Zp 150 com as alterações no modelo CAD.

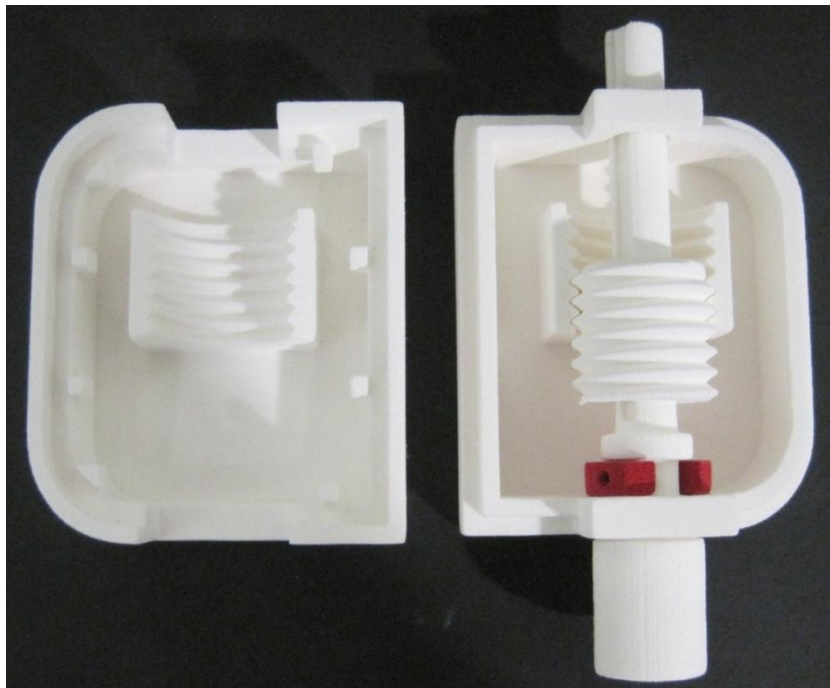


Figura 3.32 – Modelo Funcional Pó Zp 150

Este mecanismo encaixa na perfeição e o componente roscado desliza para cima e para baixo como é pretendido. Visualmente é perceptível a melhor definição das superfícies, assim como o modelo tenta a funcional de um modo mais estável durante um maior período de tempo. Isto é, aparentemente as suas superfícies resistem melhor ao desgaste.

3.8 Referências

Prototipagem, (2012), “Prototipagem Rápida de Produto”

URL:<http://www.ebah.com.br/content/ABAAA79cAl/prototipagem-rapida-produto>, consultado em 18-10-2012.

Zp 150, (2009), “zp® 150 High Performance Composite”

URL:<http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rapidconcepts.com.au%2FPDF%2Fzp150%2520FAQ.pdf&ei=LkyFULnaKMWphAfizoGwCA&usg=AFQjCNE5Alk2T7fLJU5dNQgvBDj6FoCH8g>, consultado em 18-10-2012.

4 Análise de resultados

4.1 Análise dos desvios dimensionais obtidos na 1ª Fase - ensaios com Zp 130

4.1.1 Desvios dimensionais dos modelos segundo os eixos X e Y

Com a análise de resultados obtidos através do controlo dimensional realizado sobre os desvios do diâmetro dos modelos, podemos tirar uma conclusão sobre qual deverá ser o ajuste aplicado às dimensões do modelo CAD 3D, segundo uma orientação dos eixos X e Y, considerando a posição de fabrico, para que o modelo depois de impresso possa garantir a sua funcionalidade mecânica.

Dimensão	Ensaio	Folga obtida (mm)
Ø24	1º	0,93
Ø6 ±0,25	2º – 3º	0,02 – (-0,09)
Ø12 ±0,25	2º – 3º	0,11 – 0,03
Ø24 ±0,25	2º – 3º	0,62 – 0,58
Ø12 ±0,15	4º	0,68
Ø24 ±0,15	4º	0,51

Tabela 5.1 – Folgas Obtidas

Para modelos impressos com o pó Zp 130 e resina Zb 58 pode-se concluir que os modelos precisam de uma correção no modelo CAD na ordem dos $\pm 0,15$ mm no macho e na fêmea, onde se tem de diminuir 0,15 mm ao diâmetro da fêmea e aumentar 0,15 mm ao diâmetro do macho, para garantir a folga de $\approx 0,50$ mm pretendida, valor este que se considerou o adequado para se garantir a montabilidade dos componentes sem se correr o risco destes se partirem. Acresce o facto deste tipo de tecnologia apresentar em resultado de se tratar de um processo aditivo, uma rugosidade elevada, o que inviabiliza o uso de ajustamentos deslizante ou deslizante justo.

4.1.2 Altura dos modelos

A análise dos desvios dimensionais registados na altura dos modelos permitem-nos aferir dos desvios dimensionais dos modelos segundo o eixo Z. Isto é, considerando a posição de fabrico a altura do modelo é estabelecida pela deposição das camadas, a qual por sua vez é determinada em função da precisão de posicionamento do eixo Z do equipamento conjuntamente com o resultado do processo de acamação do pó.

Os valores obtidos na altura dos modelos apresentam um desvio entre 0,16 e 0,25 mm a mais do que o valor nominal. O que nos demonstra que a impressora possui um erro médio, para uma altura de 20 mm (valor estudado), na ordem dos 0,22 mm. Portanto

deve-se realizar um ajuste nos modelos que se querem imprimir, retirando cerca de 0,20 mm à altura com vista a obter a altura nominal pretendida.

Não foi estudado o efeito de assentamento das camadas para diferentes alturas.

4.2 Análise dos desvios geométricos obtidos na 1ª fase

a) Circularidade dos modelos

Em termos de circularidade e recorrendo à ISO 2768-2 mK, para um Ø24 os valores pretendidos devem situar-se perto dos 0,033 mm. Para os Ø6 e Ø12 os valores pretendidos são de 0,022 e 0,027 mm respetivamente. Mas devido à resolução da máquina estes valores representam em média um terço do valor real obtido o que nos leva a avaliar as peças como sendo um IT12, ISO 2768-2 cL. Avaliando por esse critério para Ø6, Ø12 e Ø24 mm o valor máximo pretendido passa para 0,12, 0,18 e 0,21 mm respetivamente.

Como se observou nos gráficos da circularidade as médias de valores obtidos variaram entre 0,066 e 0,170 mm para Ø6 mm, para Ø12 mm variaram entre 0,022 e 0,188 mm e para Ø24 mm a circularidade variou entre 0,014 e 0,073 mm os quais são valores maioritariamente abaixo dos máximos pretendidos, indicando que a impressora tem uma boa precisão em termos de circularidade.

b) Cilindricidade dos modelos

A cilindricidade dos objetos obtidos deveria obedecer à ISO 2768-2 mK sendo o valor máximo aceitável de tolerância de 0,033 mm para estes modelos, o qual é um valor impossível de alcançar recorrendo a impressão 3D, devido à precisão de impressão do equipamento. Portanto para avaliar a cilindricidade dos modelos recorreu-se à ISO 2768-2 cL a qual nos dá um valor máximo de tolerância de 0,21 mm o que se torna mais adequado para a análise dos resultados obtidos.

A cilindricidade dos modelos obtidos varia entre 0,031 e 0,232 mm. Sendo que só um dos modelos ultrapassou o valor pretendido de 0,21 mm.

c) Planeza dos modelos

Para a planeza dos modelos obtidos verificou-se um resultado inferior ao valor máximo permitido (0,1 mm para Ø6 e menor que 0,2 mm para Ø12 e Ø24 mm, ISO 2768-2 cL). Com valores médios a variar entre os 0,004 e 0,034 mm estes encontram-se dentro das especificações de tolerânciamento geral para a planeza de acordo com a norma ISO 2768-2 mK o que permite obter uma qualidade superior face à especificada para a ISO 2768-2 cL. Para a ISO 2768-2 mK os valores máximos são de 0,05 mm para Ø6 mm e de 0,1 mm para Ø12 e Ø24 mm. Em nenhum dos casos são ultrapassados os valores referidos pela ISO 2768-2 mK o que garante uma boa planeza dos modelos impressos por esta tecnologia.

4.3 Análise das técnicas de acabamento da superfície dos modelos -1ª fase

Na tabela seguinte são observados os erros dimensionais dos provetes impressos com Zp 130 e sem qualquer tipo de acabamento ou revestimento.

Dimensão	Medição	Erro (%)
5	4,92	-1,60
4	3,95	-1,25
3	2,99	-0,33
2	2,01	0,50
1	1,07	7,00

Tabela 5.2 – Erros de Impressão

Com os valores obtidos chega-se a conclusão que a impressora tem um maior erro associado nas paredes com espessuras mais finas.

Na tabela seguinte apresentam-se os desvios médios dos revestimentos aplicados.

Revestimento	Desvio Médio (mm)
Tinta Acrílica - Pincelado	0,03
Tinta Acrílica - Mergulhado	0,04
Tinta - Spray	>0,02
Verniz de Madeira - Pincelado	>0,04
Verniz de Madeira - Mergulhado	>0,04

Tabela 5.3 – Desvio Médio dos Revestimentos

Analisando os revestimentos utilizados, pode-se concluir que se obtém os melhores resultados aplicando tinta acrílica por pincelagem, com um desvio médio de apenas 0,03 mm. Com o revestimento de spray a alteração média é de apenas 0,02 mm mas apenas nas camadas mais grossas, pois, nas camadas mais finas observou-se um pequeno empeno, provável justificado pelo nível de impregnação do revestimento no material do modelo. Portanto se se pretender revestir qualquer tipo de espessura a melhor escolha é a tinta acrílica, mas se se estiver a trabalhar com objetos com espessuras médias mais altas pode-se aplicar tinta em spray.

4.4 Análise dos desvios dimensionais obtidos na 2ª Fase - ensaios com Zp 150

4.4.1 Desvios dimensionais dos modelos segundo os eixos X e Y

Para modelos impressos com o pó Zp 150 e resina Zb 58 chegou-se à conclusão que os modelos precisam de uma correção no modelo CAD na ordem dos $\pm 0,15$ mm no macho e na fêmea, onde se tem de aumentar 0,15 mm ao diâmetro da fêmea e diminuir 0,15 mm ao diâmetro do macho, para garantir a folga de $\approx 0,50$ mm pretendida.

Dimensão	Ensaio	Folga obtida (mm)
Ø24	1º – 2º	-0,47 – 0,03
Ø24 $\pm 0,05$	3º	-0,05
Ø24 $\pm 0,10$	3º	0,32
Ø24 $\pm 0,15$	2º – 3º	0,49 – 0,49
Ø24 $\pm 0,15$	4º	0,28

Tabela 5.4 – Folgas Obtidas

4.4.2 Altura dos modelos

Os valores obtidos na altura dos modelos apresentam um desvio entre 0,19 e 0,24 mm a mais do que o valor que deviam de ter, que são praticamente os mesmos valores obtidos na primeira fase. Demonstra-se assim que independentemente do pó utilizado a impressora possui um erro na altura na ordem dos 0,22 mm. Portanto deve-se realizar um ajuste nos modelos que se querem imprimir, retirando cerca de 0,20 mm à altura com vista a obter a altura nominal pretendida.

4.5 Análise dos desvios geométricos obtidos na 2ª fase

a) Circularidade dos modelos

Em termos de circularidade e recorrendo à ISO 2768-2 cL, para um Ø24 mm os valores pretendidos devem ser inferiores a 0,21 mm (pelo mesmo motivo usado para o pó Zp 130).

Nesta fase os valores médios obtidos variam entre 0,010 e 0,188 mm o que é um valor abaixo do valor máximo permitido, indicando uma boa circularidade para os modelos obtidos.

b) Cilindricidade dos modelos

Como na primeira fase (pó Zp 130), para o pó Zp 150 o valor de cilindruidade aceitável devia ser abaixo dos 0,033 mm ISO 2768-2 mK, o qual é um valor demasiado baixo para o toleranciamento das peças obtidas por este tipo de equipamento. O valor para ISO

2768-2 cL é de 0,21 mm o que se torna mais adequado para a análise dos resultados obtidos.

A cilindridade dos objetos obtidos nesta fase varia entre 0,036 e 0,209 mm. O que é semelhante aos resultados obtidos com o pó Zp130. Em nenhum dos casos o valor da cilindridade superou ao valor pretendido de 0,21 mm, ISO 2768-2 cL.

Assim podemos concluir que os resultados de cilindridade não são afetados pela qualidade do pó ou material dos modelos, antes devem resultar das limitações tecnológicas do equipamento.

c) Planeza dos modelos

Analisando os valores obtidos, para a planeza dos modelos impressos, na segunda fase pode-se concluir que os modelos obtidos são bastante planos pois com valores a variar entre 0,001 e 0,016 mm garante-se uma ISO 2768-2 mK (onde para o Ø24 mm o valor deve ser inferior a 0,1 mm). Igualmente ao que foi referido na primeira fase (para o pó Zp 130) a norma ISO 2768-2 mK o que permite obter uma qualidade superior face à especificada para a ISO 2768-2 cL.

Garante-se assim a planeza dos modelos impressos por esta tecnologia.

4.6 Análise das técnicas de acabamento da superfície dos modelos -2ª fase

Na tabela seguinte são observados os erros dimensionais dos provetes impressos.

Dimensão	Medição	Erro (%)
5	5,06	1,20
4	3,97	-0,50
3	3,05	1,67
2	2,03	1,50
1	1,07	7,00

Tabela 5.5 – Erros de Impressão

Com os valores obtidos chega-se a conclusão, à semelhança da primeira fase, que a impressora tem um maior erro associado nas paredes com espessuras mais finas.

Na tabela seguinte apresentam-se os desvios médios dos revestimentos aplicados.

Revestimento	Desvio Médio (mm)
Tinta Acrílica - Pincelado - Forno	0,03
Tinta Acrílica - Pincelado	0,02
Tinta - Spray	0,02
Verniz de Madeira - Pincelado	0,05
Cola Transparente	<0,01
Verniz - Spray	<0,01
Água – Forno	0,02
Água	0,03

Tabela 5.6 – Desvio Médio dos Revestimentos

Analisando os revestimentos utilizados, chega-se à conclusão de que se obtém os melhores resultados aplicando verniz por spray e cola transparente, com um desvio médio abaixo dos 0,01 mm.

Em seguida os revestimentos com melhores resultados foram a tinta acrílica pincelada, tinta por spray e água com desvios de apenas 0,02 mm.

Neste ensaio o verniz por spray foi o que apresentou melhor qualidade/desvio do valor original do provete.

Comparando a tinta pincelada entre a primeira fase e a segunda fase, os valores obtidos mantêm-se bons e esta pode ser considerada igualmente uma boa solução.

A água e a cola transparente mostraram ser bons revestimentos a nível dimensional, mas devido a ser água e cola líquida, se o revestimento não for aplicado com cuidado pode-se danificar a superfície do objeto.

4.7 Confrontação com a literatura

Da literatura analisada para o caso do pó Zp 130 os valores obtidos para os erros de medição para as espessuras de 1, 2, 3, 4 e 5 mm foram as seguintes. Estes dados foram retirados de um estudo realizado no Instituto de Ciência Médica da Universidade de Toronto (A.D. Vesca, 2009).

	Estudo de Referência – Zp 130			1ª Fase – Zp 130		
Dimensão	Medição	Desvio	Erro (%)	Medição	Desvio	Erro (%)
5	4.95	0,05	-1.0	4,92	0,08	-1,60
4	4.02	-0,02	+0.5	3,95	0,05	-1,25
3	3.00	0	0.0	2,99	0,01	-0,33
2	2.05	-0,05	+2.5	2,01	-0,01	+0,50
1	1.20	-0,20	+20.0	1,07	-0,07	+7,00

Tabela 5.7 – Comparação de Valores pó Zp 130 com a Literatura Existente

Desta comparação pode-se observar que nos dois casos o maior erro obtido foi verificado na parede da 1 mm de espessura. Na parede com 3 mm de espessura foi onde se verificou menor erro, sendo este próximo de zero. Para os valores de 4 e 5 mm os valores voltam a ter maior erro em ambos os casos.

Desta análise podemos perceber que os valores obtidos neste ensaio são próximos dos obtidos por outros investigadores.

Os valores obtidos demonstram uma boa precisão nunca ultrapassando 5% de erro para paredes acima dos 2 mm

Para o pó Zp 150 não se conseguiu encontrar literatura para comparação de resultados, devido a este ser um consumível relativamente recente. Na tabela seguinte compara-se os valores obtidos do Zp 150 com o estudo referido anteriormente.

	Estudo de Referência – Zp 130			2ª Fase – Zp 150		
Dimensão	Medição	Desvio	Erro (%)	Medição	Desvio	Erro (%)
5	4.95	0,05	-1.0	5,06	-0,06	+1,20
4	4.02	-0,02	+0.5	3,98	0,03	-0,50
3	3.00	0	0.0	3,05	-0,05	+1,67
2	2.05	-0,05	+2.5	2,03	-0,03	+1,50
1	1.20	-0,20	+20.0	1,07	-0,07	+7,00

Tabela 5.7 – Comparação de Valores pó Zp 150 com a Literatura Existente

(Nesta comparação e como já se tinha observado anteriormente em termos de altura a ZPrinter demonstra um erro associado, onde tem maioritariamente um desvio positivo.)

Esses desvios maioritariamente positivos comprovam os valores obtidos nos ensaios de junções funcionais, onde no pó Zp 130 se teve de diminuir o diâmetro da fêmea e

aumentar o diâmetro do mancho e no pó Zp 150 teve de se realizar a alteração oposta aumentando o diâmetro da fêmea e diminuindo o diâmetro do macho.

4.8 Referências

A.D. Vesca et. al., (2009), "C-arm Cone Beam CT Guidance of Sinus and Skull Base Surgery: Quantitative Surgical Performance Evaluation and Development of a Novel High-Fidelity Phantom", Proc. of SPIE Vol. 7261 72610L-1

5 Conclusões

Com este estudo podemos tirar várias conclusões em termos de toleranciamentos e possíveis revestimentos a aplicar em modelos obtidos por prototipagem rápida utilizando a tecnologia da Zprinter.

Em termos gerais pode-se concluir que o pó Zp 150 apresenta um melhor comportamento que o pó antigo Zp 130, em termos reprodução de detalhes e pormenores dos modelos, acabamento superficial e manuseamento. Reduzindo significativamente a libertação de partículas de pó, existentes na superfície, durante a fase de manuseamento dos modelos. Assim conclui-se que o material Zp 130 é bastante frágil, tanto para imprimir provetes de teste como modelos funcionais, o que faz com que o desgaste e ou destruição do material seja frequente.

No estudo de análise de desvios e estabelecimento de tolerâncias podemos concluir que os modelos obtidos por impressão 3D com o pó Zp 130 necessitam de um ajuste no modelo CAD de ± 0.15 mm no macho e na fêmea, sendo necessário diminuir 0,15 mm ao diâmetro da fêmea e aumentar 0,15 mm ao diâmetro do macho, para garantir a folga de $\approx 0,50$ mm pretendida, valor pelo qual se conseguem realizar os movimentos deslizantes entre os componentes dos protótipos sem comprometer a sua integridade.

Na impressão 3D de modelos com o pó Zp 150, estes necessitam de um ajuste no modelo CAD de ± 0.15 mm no macho e na fêmea, onde é necessário aumentar 0,15 mm ao diâmetro da fêmea e diminuir 0,15 mm ao diâmetro do macho, para garantir o mesmo valor de folga de $\approx 0,50$ mm.

Em relação aos desvios dimensionais verificou para ambos os materiais Zp 130 e Zp 150 que os desvios maiores, entre 7% e 20%, registam-se nas paredes muito finas (1 mm). As paredes de três milímetros de espessura são aquelas que apresentam desvios menores ou até nulos e os desvios voltam a aumentar nas espessuras maiores, sendo que nos ensaios realizados podemos estimar que os desvios são inferiores a 5% da dimensão nominal.

Na análise da altura dos objetos, os resultados obtidos demonstraram um acréscimo de na ordem dos 0,2 mm para um valor nominal de altura de 20 mm, portanto cerca de 1%, Este erro deverá ser confirmado para valores de altura bastante mais elevados. De qualquer forma é um valor indicativo para eventuais correções que se possam fazer no modelo CAD.

Em termos de análise dos desvios geométricos dos modelos em termos de circularidade dos modelos em ambos os materiais, pó Zp 130 e Zp 150, estes estão dentro dos valores máximos permitidos pela ISO 2768-2 mK. No caso da cilindridade em ambas as fases o valor da cilindridade ficou dentro da tolerância. Confirmando assim as referências científicas desta tecnologia em termos de precisão geométrica dos modelos obtidos.

Em termos de análise da planeza dos modelos em ambos os materiais, pó Zp 130 e Zp 150, os resultados obtidos são bastante semelhantes e dentro das tolerâncias especificadas para a ISO 2768-2 mK.

Em termos dos revestimentos estudados, para o pó Zp 130 o material que demonstrou melhor acabamento e funcionalidade foi a tinta acrílica aplicada por pincelagem, pois apresenta um desvio das medidas do provete de apenas 0,03 mm e nenhum empeno. Após a aplicação desta tinta também se observa que o desgaste e destruição dos modelos são diminuídos drasticamente. Pode-se então concluir que este pode ser uma alternativa de baixo custo em termos de apresentação e funcionalidade para modelos obtidos por prototipagem rápida

No caso dos modelos impressos com o pó Zp 150, o revestimento que demonstrou uma menor alteração dimensional do modelo foi o verniz aplicado por spray com apenas um desvio de 0,01 mm do valor do provete. Este revestimento não foi comparado nem utilizado no ensaio com o pó Zp 130. Este revestimento é praticamente transparente, mas se por outro lado se pretender dar cor ao modelo é também possível obter um bom acabamento superficial através da aplicação da tinta acrílica por pincelagem, cujos desvios registados foram igualmente de 0,03 mm.

Através da obtenção dos modelos funcionais foi possível verificar e validar os resultados do estudo, garantindo previamente a montabilidade e funcionalidade dos diversos elementos obtidos, mas se não se aplicar nenhum tipo de revestimento o modelo impresso sofre um desgaste acelerado da superfície, devido à libertação de partículas e começa a perder precisão com o uso, facto mais acentuado com a utilização do pó antigo Zp 130. Deste modo verifica-se que o revestimento cumpre um duplo efeito, melhorando o acabamento superficial para manuseamento e reduzindo o desgaste acelerado provocado pela libertação de partículas da superfície.

Nos modelos funcionais criados obtiveram-se uma boa funcionalidade dos elementos de ligação, o que permite tornar válidos os valores deste estudo para futuros projetos que envolvam o uso desta tecnologia de impressão tridimensional para a realização de protótipos técnico-funcionais.

Os revestimentos estudados confirmaram que é possível utilizar técnicas de acabamento dos modelos, com custos mais acessíveis do que os que seriam realizados caso fossem aplicados os materiais recomendados pelo fabricante, nomeadamente ZBond 90.

Para os dois ensaios conclui-se que depois de aplicadas as alterações nos modelos CAD os modelos, junções cilíndricas simples, guiadas, roscadas e o mecanismo demonstram uma boa funcionalidade mecânica. Apesar da análise ser focada nos modelos guiados simples, obteve-se valores bastante satisfatórios na análise dos restantes modelos após as alterações nos modelos. Com os revestimentos seleccionados obtiveram-se melhorias da performance mecânica e funcional em todos os modelos estudados.